CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
(C.R.T.)
CENTRE FOR RESEARCH ON TRANSPORTATION

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE DES HAUTES ÉTUDES COMMERCIALES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE

MÉMOIRE D'ÉTUDIANT

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS
UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
C.P. 6128, SUCCURSALE A,
MONTRÉAL
CANADA H3C 3J7

TÉLÉPHONE: (514) 343-7575
TÉLEX: 05-24146 BIBPOLYTEC
EMAIL: crt@crt.umontreal.ca
TÉLÉCOPIEUR (FAX): (514) 343-7121

CRT-753

Synthèse des modèles continus en logistique et analyse d'un problème de collecte

par
Pontien Mbaraga

Mémoire de Maîtrise es Sciences Appliquées, département de mathématiques appliquées, Ecole Polytechnique, dirigé par André Langevin.

Centre de recherche sur les transports — Publication #753

Janvier 1991

Dépôt légal – 1er trimestre 1991

91-02141/

ABSTRACT

In this dissertation, we are particularly concerned with continuous modelling in logistics.

After having presented the fundamental concepts related to logistics, we first develop systematically a synthesis of important continuous models developed in logistics during the past thirty years. The approach used consists in grouping logistic problems into different types of problems according to criteria already defined. Moreover, for each type of problem and reference, we present a brief description which gives a general idea of the model developed.

By using a method of continuous analytical approximations, we then analyze a concrete problem in logistics: the collection of fresh milk from several suppliers evenly distributed in a region which surrounds a dairy farm located at the centre of this region. The collection is done by trucks which hold a limited capacity for a fixed time period. The analytical method proposed to design zones assigned to one truck in a region takes into consideration the constraints of time and capacity. The main objective is to minimize the total cost in dollars per load transported of the collection. The optimal dimensions of a zone are obtained as a function of its distance from the dairy farm according to whether the time constraints or capacity constraints (or both) are active.

In conclusion, we discuss the importance of our synthesis in terms of future research and mention several possible variants in the model presented here.

REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord exprimer mon affectueuse gratitude à l'endroit de mon directeur de recherche, Monsieur André Langevin, qui m'a intéressé à ce sujet de recherche. Son ouverture d'esprit et sa grande disponibilité en tout temps m'ont permis de tirer profit de ses précieuses suggestions tout au long de la réalisation de ce travail.

Mon codirecteur de recherche, Monsieur François Soumis, mérite toute ma reconnaissance pour les conseils qu'il m'a prodigués avec tant d'amitié et ses commentaires judicieux, enrichis d'une expérience de plusieurs années de carrière m'ont été d'une utilité indéniable.

Je dois remercier de façon particulière mon épouse Jacqueline Mujawimana qui, avec sa très grande patience, a toujours su créer autour de moi une ambiance favorable tout au long de mes recherches.

Je tiens également à exprimer mes sincères remerciements au Programme Canadien de Bourses de la Francophonie pour le financement de mes études et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, n'ont ménagé aucun effort pour m'apporter leur soutien.

Finalement, je dois adresser un grand merci à Lucie L'Heureux pour son ardeur et le soin qu'elle a su mettre à la dactylographie de ce manuscrit.

SOMMAIRE

Dans ce mémoire, nous nous intéressons de façon particulière à la modélisation continue en logistique.

Après avoir présenté quelques notions de base sous-jacentes à la logistique et aux modèles continus en logistique, nous élaborons systématiquement, en premier lieu, une synthèse d'importants modèles continus développés en logistique au cours de trois dernières décennies. L'approche utilisée consiste à classifier les problèmes de logistique traités en divers types selon des critères bien définis. De plus, nous fournissons, pour chaque type de problèmes et ses références, une présentation succinte permettant d'avoir une idée générale sur le modèle développé.

Nous analysons ensuite, sous une approche d'approximations analytiques continues, un problème concret de logistique : collecte de lait frais de plusieurs fournisseurs uniformément distribués dans une région, supposée circulaire, à une usine laitière localisée au centre de cette région. La collecte est assurée par des camions de capacité limitée et dans une période de temps fixe. La méthode analytique proposée pour faire le design des zones d'une région, chacune étant affectée à un seul camion, tient compte à la fois des contraintes de durée et de capacité et a pour objectif de minimiser le coût total de collecte par unité de charge transportée. Les dimensions optimales d'une zone sont obtenues en fonction de son éloignement de l'usine selon que la contrainte de durée ou de capacité est active voire même toutes les deux saturées.

La conclusion de ce travail souligne l'importance de notre synthèse au niveau des recherches en perspective et évoque aussi quelques variantes possibles du modèle présenté.

Mots-clés : Logistique, distribution, collecte, modèles continus.

TABLE DES MATIÈRES

Page

SOMMAIRE. v

ABSTRACT. vii

REMERCIEMENTS viii

LISTE DES TABLEAUX. xii

LISTE DES FIGURES xiii

INTRODUCTION. 1

CHAPITRE PREMIER : GÉNÉRALITÉS. 4

1.1 - Aperçu sur la logistique 4

1.1.1 - Historique de la logistique. 4

1.1.2 - Définition de la logistique. 5

1.1.3 - Le système logistique et ses composantes . . . 5

1.1.3.1 - Le sous-système approvisionnement. . 7

1.1.3.2 - Le sous-système production 7

1.1.3.3 - Le sous-système distribution physique 7

1.1.4 - Fonction logistique ou Coût total. 9

1.1.4.1 - Interdépendance des coûts en logistique 9

1.2 - Généralités sur les modèles continus en logistique . . 11

1.2.1 - Idée générale. 11

1.2.2 - Exemples de modèles continus en logistique . . 11

1.2.3 - Intérêts et inconvénient 12

CHAPITRE DEUXIÈME : REVUE SYNTHÉTIQUE DES PRINCIPAUX MODÈLES CONTINUS EN LOGISTIQUE. 13

2.1 - Revue de la littérature. 13

Page

CHAPITRE DEUXIÈME (suite)

2.2 - Schéma de classification pour les problèmes de logistique 16

2.2.1 - Taxonomie pour distinguer les problèmes de logistique. 16

2.2.2 - Quelques définitions et termes utilisés. 17

2.2.2.1 - Définitions. 17

2.2.2.2 - La stratégie de bande de Daganzo (1984a) 17

2.2.2.3 - "Dual-Strip Routing" 17

2.2.2.4 - "Single-Strip Routing" 22

2.2.2.5 - La livraison directe ("Direct Shipping") 26

2.2.2.6 - Le colportage ("Peddling") 27

2.2.2.7 - Collecte ("Collecting"). 28

2.2.2.8 - Regroupement d'abord, construction des itinéraires ensuite ("Clustering-First, Route-Second"). 28

2.3 - Survol des principaux problèmes/modèles continus de logistique 28

2.3.1 - Minimisation de la distance moyenne (temps moyen) de parcours/du coût total 31

2.3.1.1 - Problèmes de distribution "origine unique-destinations multiples" ("One-to-Many"). 31

Page

CHAPITRE DEUXIÈME (suite)

2.3.1.2 - Problèmes de collecte "origines multiples-destination unique" ("Many-to-One") 40

2.3.1.3 - Problèmes de distribution "origines multiples-destinations multiples" ("Many-to-Many") 41

2.4 - Méthodes de résolution 43

2.5 - Conclusion 44

CHAPITRE TROISIÈME : UN PROBLÈME DE COLLECTE DE PRODUITS PÉRISSABLES AVEC CONTRAINTES TEMPORELLE ET DE DE CAPACITÉ. 45

3.1 - Introduction 45

3.2 - Modèle analytique. 47

3.2.1 - Formulation du modèle analytique 48

3.2.2 - Résolution du modèle analytique. 53

3.2.2.1 - Cas 1 : La contrainte de capacité (3.12a) saturée. 54

3.2.2.2 - Cas 2 : Les deux contraintes (3.11a) et (3.12a) saturées. 55

3.2.2.3 - Cas 3 : La contrainte temporelle (3.11a) saturée. 56

3.2.2.4 - Étude particulière pour l'anneau central. 59

3.2.2.5 - Algorithme de solution 62

CONCLUSION. 67

BIBLIOGRAPHIE 69

LISTE DES TABLEAUX

Page

Tableau 1.1 : Les sous-systèmes du système logistique et leurs objectifs. 8

Tableau 2.1 : Taxonomie pour distinguer les problèmes de logistique 18

Tableau 2.2 : Index des types de problèmes et références . . . 20

Tableau 2.3 : Informations supplémentaires sur les problèmes . 30

Tableau 3.1 : Solutions optimales de f(x) comparées à f(x*). . 58

LISTE DES FIGURES

Page

Figure 1.1 : Le système logistique d'une entreprise. 6

Figure 1.2 : Coût total en fonction du nombre d'entrepôts. . . 10

Figure 2.1 : Découpage d'une région de demande 23

Figure 2.2 : La stratégie de bande de Daganzo (1984a). 24

Figure 2.3 : "Dual-Strip Routing". 24

Figure 2.4 : "Single-Strip Routing". 25

Figure 2.5 : La livraison directe dans une région de demande . 26

Figure 2.6 : Le colportage avec ses étapes dans un district de service. 27

Figure 2.7 : Collecte dans un district d'approvisionnement pour un problème "origines multiples-destination unique". 29

Figure 2.8 : Collecte et distribution d'articles dans une région de service pour un problème "origines multiples-destinations multiples" sans dépôt. . . 29

Figure 3.1 : Découpage d'une région circulaire en zones. . . . 49

Figure 3.2 : Une zone de collecte dans un anneau de rayons intérieur r_{k-1} et extérieur r_k. 49

Figure 3.3 : La grandeur optimale (d'une zone) et coût total par unité de charge transportée dans une zone de collecte 57

Figure 3.4 : Découpage en pointes de tarte de l'anneau central 60

Figure 3.5 : Une zone de l'anneau central. 60

INTRODUCTION

La logistique moderne joue un rôle capital dans les entreprises industrielles. Elle a donc pour mission de bien répondre à l'approche globale d'une catégorie de préoccupations ayant un objectif commun : satisfaire à la demande de produit au moindre coût (Lambillotte, 1976).

Pour ce faire, il est nécessaire qu'il y ait plus de coordination et plus de cohésion en matière d'activités logistiques pour minimiser les coûts associés. Ces activités logistiques sont diversifiées et englobent notamment le traitement de commande, la gestion des stocks, la manutention, l'entreposage, l'emballage, le transport, la localisation d'usines et d'entrepôts, etc.

Il existe dans la littérature de nombreux modèles développés en utilisant des méthodes de résolution exactes ou analytiques pour certains problèmes spécifiques reliés à la logistique. Ainsi, par exemple, Brandeau et Chiu (1989) fournissent une revue de littérature des modèles discrets des principaux problèmes de localisation.

Ce mémoire présente, d'une part, une revue synthétique des modèles continus en logistique; c'est-à-dire des modèles obtenus en utilisant des méthodes analytiques d'approximations continues. Ces modèles se basent surtout sur la densité spatiale des clients et sur la distribution de la demande des clients plutôt que sur les demandes des clients spécifiques en des lieux précis.

D'autre part, le mémoire traite un problème concret de logistique : la collecte de lait frais de plusieurs fournisseurs d'une région à une usine laitière située au centre de cette région au moyen des camions de capacité limitée et dans une période de temps fixe.

Le chapitre 1 de ce mémoire, destiné en principe au lecteur non initié, fournit brièvement certaines généralités aussi bien sur la logistique moderne que sur les modèles continus en logistique tout en s'efforçant de préciser leurs caractéristiques essentielles.

C'est dans le chapitre 2 que nous présentons une revue synthétique des principaux modèles continus en logistique. Nous faisons un survol d'importants problèmes de logistique étudiés en utilisant des modèles continus au cours de ces trois dernières décennies.

Les problèmes de logistique traités par différents auteurs ont été regroupés en dix types (ou catégories) dont chacun comporte des références appropriées. Nous présentons une brève description de chaque type de problème ainsi que, dans la presque totalité des cas, celle de chacune des références associées. De plus, d'autres informations supplémentaires sur chaque type de problèmes sont confinées dans un tableau approprié (Tableau 2.3). Nous signalons très brièvement vers la fin de ce chapitre les caractéristiques des catégories de méthodes de résolution le plus souvent rencontrées dans ce domaine.

Dans le chapitre 3, après avoir défini un problème précis de logistique, la collecte de lait frais, nous proposons un modèle analytique pour le résoudre. Ce problème de collecte de lait frais est formulé comme un problème d'approvisionnement "origines-multiples, destination unique" avec contraintes de temps et de capacité sur les camions de service. Le modèle proposé permet de faire le design presque optimal des zones de collecte, chacune affectée à un seul camion, pour minimiser le coût total par unité de charge transportée incluant les coûts d'opération des camions et les coûts fixes d'arrêts chez les fournisseurs. Le chapitre se termine par un algorithme de solution du modèle proposé.

Nous concluons par le chapitre 4 où nous résumons le contenu du mémoire tout en précisant sa contribution au niveau de la recherche et terminons en suggérant quelques avenues de recherches en perspective.

CHAPITRE PREMIER
GÉNÉRALITÉS

L'objectif du présent chapitre est de fournir d'une manière générale quelques notions de base sur la logistique et présenter sommairement quelques caractéristiques particulières liées aux modèles continus en logistique.

1.1 Aperçu sur la logistique

1.1.1 Historique de la logistique

Les origines de la logistique moderne peuvent être retracées lors de développements systématiques survenus dans la logistique militaire pendant la deuxième guerre mondiale par l'armée américaine "qui a, en même temps, fait progresser cette technique d'aide à la décision qu'est la Recherche Opérationnelle, et sans laquelle l'essor actuel de la logistique ne serait pas ce qu'il est" (Lambillotte, 1976).

En terminologie militaire, le terme "logistique" représente "l'art de combiner tous les moyens de transport, de ravitaillement et de logement des troupes" (Robert, 1978), pour atteindre de façon systématique et efficace les objectifs poursuivis par les forces armées.

Après la deuxième guerre mondiale, la logistique a commencé d'abord à se développer au sein des entreprises industrielles et commerciales des États-Unis et leur a procuré des profits considérables et une bonne vision de la gestion.

C'est probablement vers les années 1970 que la logistique a commencé à ouvrir ses horizons en franchissant l'Atlantique et s'installer à "petit pas" dans les entreprises européennes.

Ainsi, la logistique, est une discipline nouvelle offrant de nombreux avantages tant pour les grosses entreprises que les petites.

1.1.2 Définition de la logistique

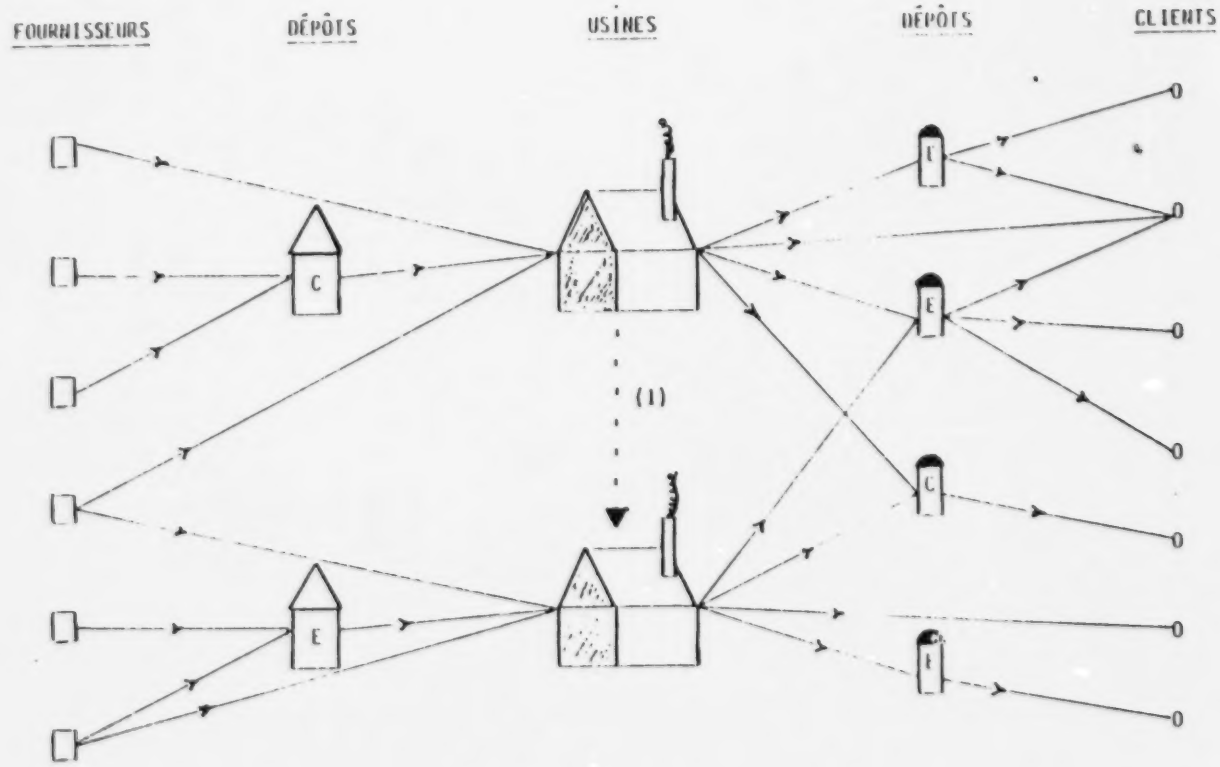
Par la suite, le terme "logistique" est considéré en contexte industriel et commercial. Il existe de nombreuses définitions de la logistique qui varient d'un auteur à l'autre.

Ainsi prendrons-nous comme définition de la logistique celle donnée par Bowersox (1978) : "le champ d'activité dont le but est d'assurer la gestion du cheminement et de l'entreposage des matières premières, produits semi-finis et finis, des sources d'approvisionnement jusqu'au client final, en passant par les différents points de transformation et de transfert".

1.1.3 Le système logistique et ses composantes

Afin de mieux saisir l'organisation de la fonction logistique en tant que "système logistique", nous adoptons l'idée de Lambillotte (1976) consistant à diviser le système logistique en différents "sous-systèmes" (ou composantes) d'activités logistiques spécifiques tout en s'efforçant de préciser la contribution de chacun au niveau de l'objectif global.

La figure 1.1. éclaircit bien la définition précédente de la logistique et illustre le système logistique d'une entreprise décomposé en trois sous-systèmes. L'entreprise s'approvisionne en matières premières, les transforme dans ses usines en produits semi-finis et finis devant être acheminés aux clients ou points de ventes par un réseau de distribution incluant des entrepôts. Sauf mention expresse, on ne fera aucune différence dans la suite entre les termes dépôts et entrepôts ainsi que stockage et entreposage.



Légende : C = Consolidation
E = Entreposage

(1) = Transport inter-usine (lorsque l'un des produits élaboré par une usine sert de matière première à l'autre).

Figure 1.1 : Le système logistique d'une entreprise

Il est particulièrement important de noter que le degré de complexité du système logistique peut varier considérablement compte tenu du cas étudié. Néanmoins, on retrouve le plus souvent les trois composantes ci-après.

1.1.3.1 Le sous-système approvisionnement

À partir des divers fournisseurs, cette catégorie d'activités logistiques se consacre essentiellement au transport et stockage des matières premières et/ou produits semi-finis jusqu'à la mise à disposition du sous-système production (usines de fabrication de produits finis) et présente ainsi un intérêt pour celui-ci.

1.1.3.2 Le sous-système production

Le sous-système production s'occupe de la transformation des matières premières et/ou produits semi-finis en produits finis, du stockage de ces derniers et les tient à la disposition du sous-système distribution physique.

1.1.3.3 Le sous-système distribution physique

Le sous-système distribution physique assure le cheminement des produits finis jusque chez les divers clients en passant par des entrepôts intermédiaires. Il interagit directement avec les clients et peut, par conséquent, jouer une certaine influence sur le marketing.

Toutefois, il est plus commode dans chaque cas particulier, de bien préciser les limites des sous-systèmes pour analyser et contrôler efficacement les activités logistiques. Le tableau 1.1 tiré de Lambillotte (1976) représente les objectifs de chaque sous-système du système logistique. Dans le même tableau, les marchandises (c'est-à-dire les produits achetés et revendus en l'état) doivent être stockés au même endroit que les produits finis pour des raisons évidentes de constitution des commandes

Tableau 1.1 : Les sous-systèmes du système logistique et leurs objectifs (tiré dans Lambillotte, 1976).

Objectifs / Sous-systèmes	Éléments principaux du service	pour	Coût à contrôler
APPROVISIONNEMENT	Qualité Disponibilité	Matières Éléments achetés Marchandises	Achat + Transport d'appro. + Stockage
PRODUCTION	Qualité Disponibilité	Produits finis	Transformation + Stockage des produits finis et semi-finis
DISTRIBUTION PHYSIQUE	Qualité Disponibilité	Produits finis Marchandises	Transport de distribution + Stockage dépôts

pour la distribution physique, mais la responsabilité du coût de ce stock doit incomber aux approvisionnements (c'est la règle).

Remarque :

On retrouve parfois dans la littérature (Hall, 1985a) trois catégories de composantes logistiques à savoir la production, l'entreposage (ou inventaire) et le transport. Cette façon de faire résulte du fait qu'on

s'intéresse davantage à l'analyse des interdépendances et compromis des coûts associés aux différentes activités logistiques pour chaque sous-système pour mieux saisir l'essence de la logistique.

1.1.4 Fonction logistique ou Coût total

En réalité, la logistique est plus que la somme des parties précédentes; ce qui, en revanche, peut entraîner l'entreprise à courir le risque de sous-optimisation considérable au niveau de la logistique. En effet, il s'avère que la minimisation des coûts reliés à chacune des activités de la logistique n'entraînera pas nécessairement la minimisation du coût total au niveau de la firme (Roy, 1990). Pour cela, nous introduisons la notion d'interdépendance des coûts en logistique à l'aide d'un exemple pour illustrer l'importance de ce concept de coût total qui reste de loin fondamental en logistique.

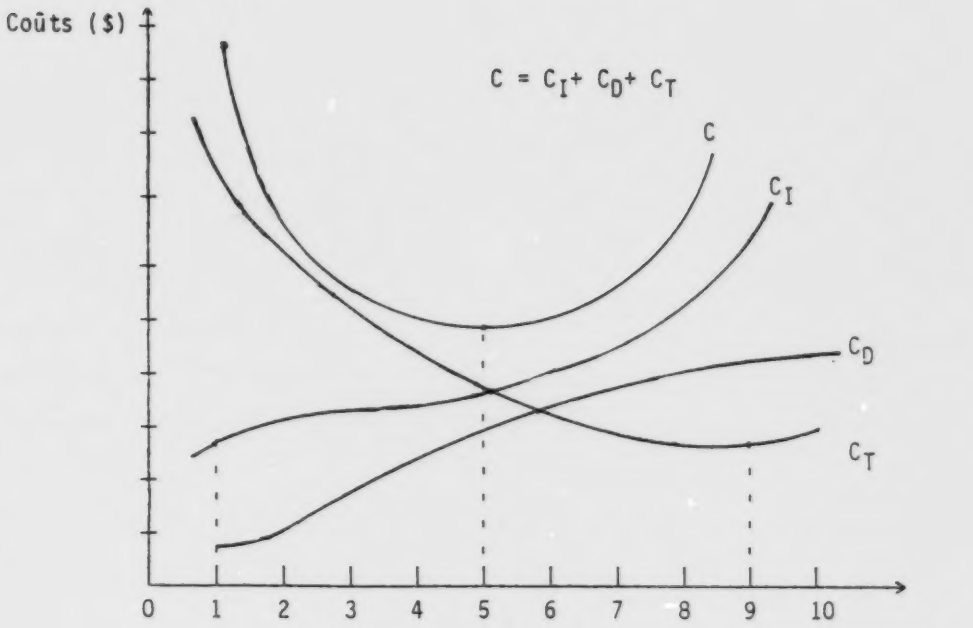
1.1.4.1 Interdépendance des coûts en logistique

Exemple :

Nous considérons le sous-système distribution physique. Une entreprise doit déterminer le nombre d'entrepôts nécessaires à installer pour minimiser ses coûts de distribution. La situation est décrite à la figure 1.2 où le coût total est exprimé en fonction du nombre d'entrepôts.

En examinant attentivement la figure 1.2, on s'aperçoit que certains coûts importants sont affectés par l'augmentation ou la diminution du nombre d'entrepôts. De plus, en optimisant la fonction logistique, i.e. le coût total, on se rend clairement compte que sa solution optimale (5 entrepôts) est différente des solutions optimales minimisant les coûts reliés aux entrepôts ou inventaires (1 entrepôt) ou les coûts de transport (9 entrepôts).

Cet exemple démontre à juste titre l'importance de l'interdépendance des coûts en logistique et met en lumière comment le concept de coût total peut servir d'outil efficace à établir des compromis entre ces coûts pour prendre de meilleures décisions.



Légende : C = Coût total
C_I = Coûts d'inventaire
C_D = Coûts reliés aux entrepôts
C_T = Coûts de transport

Figure 1.2 : Coût total en fonction du nombre d'entrepôts

Remarque :

La prise de décision en logistique ne doit pas considérer seulement la question du coût total des activités logistiques car la logistique interagit avec d'autres fonctions de l'entreprise. C'est ainsi que quelqu'un pourrait justifier, dans l'exemple précédent, l'utilisation d'un nombre d'entrepôts assez élevé pour améliorer la qualité de service offert à la clientèle en réduisant les délais de livraison (i.e. l'augmentation du nombre d'entrepôts amène ceux-ci plus proches des clients et/ou points de vente; ce qui réduit les distances de livraison et de là, les coûts de transport).

1.2 Généralités sur les modèles continus en logistique

Les modèles continus ont été introduits en logistique pour analyser spécifiquement les problèmes de distribution (voir par exemple Eilon et al., 1971) ou d'approvisionnement et ont pris un grand essor sur le plan de la recherche depuis les années 1980 comme nous allons le constater dans le chapitre 2.

1.2.1 Idée générale

Les modèles continus sont des modèles simples obtenus sous une approche d'approximations analytiques continues. Ils se basent essentiellement sur la densité spatiale des clients et sur la distribution de la demande des clients plutôt que sur les demandes des clients spécifiques dans des lieux précis.

1.2.2 Exemples de modèles continus en logistique

Nous donnons ci-après, à titre indicatif, deux exemples des problèmes de logistique pouvant être étudiés à l'aide des modèles continus.

Exemple 1 : Problème de distribution physique

Une entreprise veut assurer la distribution de ses produits au moyen des camions de son usine de fabrication (dépôt ou centre de distribution) à des clients dispersés aléatoirement sur une région environnant cette usine. L'entreprise cherche à offrir un service de qualité à ses clients tout en minimisant le coût total de logistique englobant les coûts de transport et d'inventaire.

Exemple 2 : Problème de cueillette et de livraison des colis

Une entreprise de service de messagerie en milieu urbain assure la cueillette et la livraison des lettres et des colis. Partant d'un centre de tri, chaque véhicule doit couvrir un secteur très précis de la région pour

y effectuer la cueillette et la livraison. Il revient ensuite au centre de tri pour faire trier les lettres et colis ramassés pour la livraison de la tranche suivante, et ce, en une période de temps fixe. L'objectif est de minimiser la distance totale parcourue ou le nombre total des véhicules.

1.2.3 Intérêts et inconvénient

Les modèles continus, n'exigeant que peu de données, jouent un rôle important au niveau de la planification stratégique. Ils permettent en effet aux planificateurs d'évaluer et comparer rapidement des stratégies logistiques alternatives.

Ces modèles servent, pour les problèmes de distribution, à simplifier leur analyse sans avoir besoin de spécifier un réseau très détaillé ainsi que des flots correspondants.

Les modèles continus permettent également de comprendre la caractéristique importante de l'essence de la logistique, à savoir l'interdépendance et compromis des coûts qui sont parfois obscurs lorsqu'on utilise des techniques sophistiquées.

Cependant, les résultats obtenus de ces modèles sont en général non optimaux mais permettent une bonne compréhension de tout ce qui est mis en jeu sans aller dans les détails.

CHAPITRE DEUXIÈME
REVUE SYNTHÉTIQUE DES PRINCIPAUX MODÈLES CONTINUS EN LOGISTIQUE

2.1 Revue de littérature

L'approche de modélisation continue est une technique utilisée en recherche opérationnelle comme outil d'aide à la décision notamment au niveau de la planification stratégique. L'idée n'est pas tellement ancienne; il est néanmoins surprenant de se rendre compte que certaines applications des modèles continus avaient déjà été utilisées dans le déplacement des matières premières et des produits par Kantorovich (1942) et Beckmann (1952).

À la veille des années 1960, cette technique commençait à faire ses premiers pas et s'implanter timidement au sein de différentes équipes de recherche. En effet, Beardwood et al. (1959) ont développé une formule analytique estimant la longueur totale d'une tournée d'un commis-voyageur dans des régions avec une densité uniforme de destinations. Ce résultat fut vérifié et complété plus tard par d'importants travaux de Eilon et al. (1971), Stein (1978a,b) et Larson et Odoni (1981).

Les années 1960 seront marquées essentiellement par les travaux de l'un des grands pionniers de cette technique, R[illegible] Smeed (1961, 1965, 1968) ainsi que ceux de John Wardrop (1969, 1971) dans lesquels les modèles continus furent développés principalement pour étudier le trafic des passagers dans une zone urbaine. Weiss (1985) fournit de plus amples informations sur l'appréciation des travaux de Smeed.

L'utilisation des modèles continus pour analyser les distances de parcours associées à la localisation des installations de service telles que les lieux d'approvisionnement, les stations de police et les entrepôts

fut traitée par Beckmann (1968) ainsi que, dans la période des années 1970, par Newell (1973, 1980).

De plus, cette période des années 1970 a décidément ouvert d'autres horizons à un certain nombre d'auteurs. Ainsi, par exemple, Eilon et al. (1971) ont utilisé les modèles continus pour analyser les problèmes de distribution à partir d'un dépôt desservant une région avec une densité uniforme des clients. L'objectif consistait à minimiser la distance moyenne de parcours.

L'approche d'approximation continue a servi par ailleurs non seulement à estimer les temps de réponses des véhicules d'urgence (Larson et Stevenson, 1972; Kolesar et Blum, 1973), mais aussi à analyser le problème d'un système de transport en commun partant d'un terminal central vers les destinations dispersées sur la ville et sa banlieue (Clarens et Hurdle, 1975). Dans ce dernier problème, l'opérateur du système en question se préoccupe de déterminer quand et où envoyer chaque véhicule en vue de minimiser la somme des coûts d'opération du véhicule et des usagers (i.e. coûts reliés à la durée d'attente des passagers au terminal central et aux temps passés à bord du véhicule à l'intérieur d'une zone de service local).

Daganzo et al. (1977) ont présenté un des premiers modèles d'approximation analytique, avec application pour le transport porte-à-porte, pour le problème "origines multiples-destination unique" ("Many-to-One") ainsi que Hendrickson (1978).

Le premier modèle analytique des problèmes de distribution "origines multiples-destinations multiples" ("Many-to-Many") fut présenté par Daganzo (1978) et ses résultats furent améliorés dans Daganzo (1984c).

Cependant, au cours de cette dernière décennie, l'utilisation des modèles continus a connu un essor prodigieux. De nombreuses recherches ont été consacrées à l'analyse des systèmes logistiques et plus particulière-

ment des problèmes de distribution physique dans le souci d'améliorer, d'une part, les modèles en vigueur et, d'autre part, d'élargir le champ d'intérêt par de nouveaux modèles.

Ainsi plusieurs études récentes ont encore continué à étudier les problèmes de distribution "origine unique-destinations multiples" ("One-to-Many") avec ou sans dépôts de transbordement pour minimiser les coûts de transport et/ou d'inventaire ou d'installations de service (Banks et Driscoll et Stanford, 1982; Daganzo, 1984a,b, 1987a,b; Han, 1984; Blumenfeld et al., 1985a,b,c; Burns et al., 1985; Daganzo et Newell, 1985, 1986; Cavalier et Sherali, 1986; Han et Daganzo, 1986; Campbell, 1989a,b; Langevin, 1988; Langevin et Soumis, 1989; Erlenkotter, 1989), en utilisant des modèles continus.

Il est à noter que les modèles continus obtenus pour les problèmes précédents de distribution sont parfois équivalents aux problèmes inverses "origines multiples-destination unique" ("Many-to-One"). Cependant, dans certains contextes, cette équivalence ne s'applique pas et, par conséquent, des modèles spécifiques s'avèrent nécessaires à savoir les modèles de Daganzo (1985) et Hall (1985b).

On retrouve également dans la littérature, au cours de cette dernière décennie, quelques modèles continus développés pour les problèmes de distribution "origines multiples-destinations multiples" (Hall, 1984, 1987; Hall et Daganzo, 1984; Daganzo, 1987c; Campbell, 1988).

Dans ce chapitre, nous présentons une revue des principaux modèles continus de logistique qui ont été étudiés par différents auteurs au cours de ces trois dernières décennies. Notre objectif primordial consiste donc à faire un tour d'horizon d'une dizaine de types de problèmes de logistique traités par des modèles continus. Chaque type de problème, généralement

d'optimisation, est décrit de façon concise et contient la plupart du temps quelques références appropriées.

De plus, nous avons voulu autant que possible mettre au point un outil de référence ne prétendant pas être exhaustif mais présentant plutôt la synthèse indispensable au lecteur intéressé par la recherche dans le domaine pré-cité. La grande partie des problèmes traités touche la distribution incluant des tournées de véhicules.

Dans le paragraphe 2.2, nous présentons un schéma de classification pour les problèmes de logistique considérés en utilisant une taxonomie convenable. Le paragraphe 2.3, faisant appel à cette taxonomie pour faire la présentation descriptive d'une dizaine de problèmes/modèles continus de logistique, constitue la partie principale du présent chapitre. Nous faisons, au paragraphe 2.4, le point de certaines approches de résolution les plus utilisées et terminons par une brève conclusion.

2.2 Schéma de classification pour les problèmes de logistique

Nous présentons dans ce paragraphe une taxonomie qui nous permettra de différencier les différents problèmes de logistique concernés et plus spécifiquement de distribution. Dans ces problèmes de distribution, la plupart des auteurs ont étudié les questions reliées à la localisation (i.e. déterminer le nombre optimal de dépôts (ou terminaux) ou déterminer la localisation des installations de service), aux tournées de véhicules (i.e. la longueur des tournées des véhicules ou le nombre de véhicules) ainsi qu'au découpage de la région de service pour ne citer que celles-là.

2.2.1 Taxonomie pour distinguer les problèmes de logistique

Nous adoptons la démarche inspirée par Brandeau et Chiu (1989) consistant à classifier un problème/modèle par son objectif (d'optimisation ou non-optimisation), sa(ses) variable(s) de décision et son système de paramètres.

En ce qui nous concerne, le tableau 2.1 illustre une taxonomie pour distinguer les problèmes de logistique. Nous utilisons ces informations pour mieux présenter une dizaine de types de problèmes de logistique dont chacun possède des références appropriées dans le tableau 2.2. Dans le souci de rendre plus compréhensibles les contenus des paragraphes 2.3 et 2.4, nous avons jugé bon de présenter ci-après quelques définitions et termes (reliés aux stratégies de routage) utilisés.

2.2.2 Quelques définitions et termes utilisés

2.2.2.1 Définitions

Nous désignerons par "région de demande ou de service" la surface géographique desservie par un (ou plusieurs) dépôt(s). Cette région peut être divisée en "sous-régions" ou "districts" de service contenant plusieurs points de demande.

Dans certains cas, le district de service peut être aussi partitionné en "zones (ou secteurs)" de service chacune alimentée (ou non alimentée) par un dépôt local. Le mot "service" est souvent remplacé par "livraison" (par exemple, véhicule de livraison, zone de livraison, durée de livraison, ...) dans les problèmes de distribution ou par "collecte" dans les problèmes d'approvisionnement. La figure 2.1 illustre les définitions précédentes.

2.2.2.2 La stratégie de bande Daganzo (1984a)

La figure 2.2 représente cette stratégie consistant à découper une zone à couvrir suivant une bande de largeur w et à visiter les points de demande dans l'ordre longitudinal de la bande.

2.2.2.3 "Dual-Strip Routing"

La stratégie de bande de Daganzo (1984a) est appelée "Dual-Strip" (Han, 1984) lorsqu'on effectue un seul aller-retour à l'intérieur de la

Tableau 2.1 : Taxonomie pour distinguer les problèmes de logistique

I. Objectif d'optimisation

1 = Minimiser la distance moyenne (ou le temps moyen) de parcours/le coût total.

- O_u/D_m= origine unique, destinations multiples
- O_m/D_u= origines multiples, destination unique
- O_m/D_m= origines multiples, destinations multiples
- Autre

II. Variables de décision

1 = Localisation d'entrepôt

2 = Dimensions/ou Aire de la "région" de service

3 = Nombre de véhicules de service/ou Nombre d'entrepôts

4 = Volume du véhicule de service ou capacité

5 = Nombre d'arrêts pour un véhicule de service

6 = Intervalle de durée entre expéditions des véhicules/ou longueur du cycle de production

7 = Autre

III. Système de paramètres

(1) Structure topologique :

P = Plan

R = Réseau

A = Autre

Tableau 2.1 : Taxonomie pour distinguer les problèmes de logistique (suite)

(2) Métrique de parcours

E = Euclidienne

L_1 = Manhattan

O = Autre

(3) Nombre de véhicules de service : V

(4) Nombre d'entrepôts : D

(5) Capacité des véhicules de service

F = limitée ; I = illimitée

(6) Relation entre véhicules de service :

C = coopération des véhicules

N = non-coopération des véhicules

(7) Discipline de service

1 = "Dual-strip routing" ou Bande de Daganzo (1984a)

2 = "Single strip routing"

3 = Livraison directe

4 = Colportage

5 = Collecte

6 = "Clustering-first, Route-second"

7 = Autre

Tableau 2.2 : Index des types de problèmes et références

No	Type de problème	Références
P_1	Distribution "origine unique-destinations multiples"	Beardwood et al., 1959; Eilon et al., 1971; Stein, 1978a,b; Larson et al., 1981; Daganzo, 1984a,b; Blumenfeld et Beckmann, 1985a; Newell et Daganzo, 1986a,b,c; Cavalier et Sherali, 1986; Hall, 1989.
P_2	Distribution "origine unique-destinations multiples" avec contraintes de temps	Han, 1984; Han et Daganzo, 1986; Daganzo, 1987a,b; Langevin, 1988; Langevin et Soumis, 1989; Langevin, 1989.
P_3	Distribution "origine unique-destinations multiples" avec transbordement et contraintes de temps	Han, 1984; Han et Daganzo, 1989.
P_4	Distribution "origine unique-destinations multiples" avec dépôts de transbordement	Campbell, 1989b; Erlenkotter, 1989; Rosenfield et al., 1989.

Tableau 2.2 : Index des types de problèmes et références (suite)

No	Type de problème	Références
P_5	Distribution "origine unique-destinations multiples" avec inventaire (avec ou sans dépôts)	Clarens et Hurdle, 1975; Banks, Driscoll et Stanford, 1982; Blumenfeld, Hall et Jordan, 1985c; Blumenfeld, Burns, Diltz et Daganzo, 1985b; Burns, Hall, Blumenfeld et Daganzo, 1985; Daganzo et Newell, 1985, 1986; Daganzo, 1988b; Campbell, 1989a.
P_6	Distribution ou Collecte "origines multiples-destination unique"	Daganzo, Hendrickson et Wilson, 1977; Hendrickson, 1978.
P_7	Distribution ou Collecte "origines multiples-destination unique" avec inventaire et fréquence d'expédition des véhicules	Daganzo, 1985; Hall, 1985b.
P_8	Distribution "origines multiples-destinations multiples"	Daganzo, 1978; Bélisle, 1989.

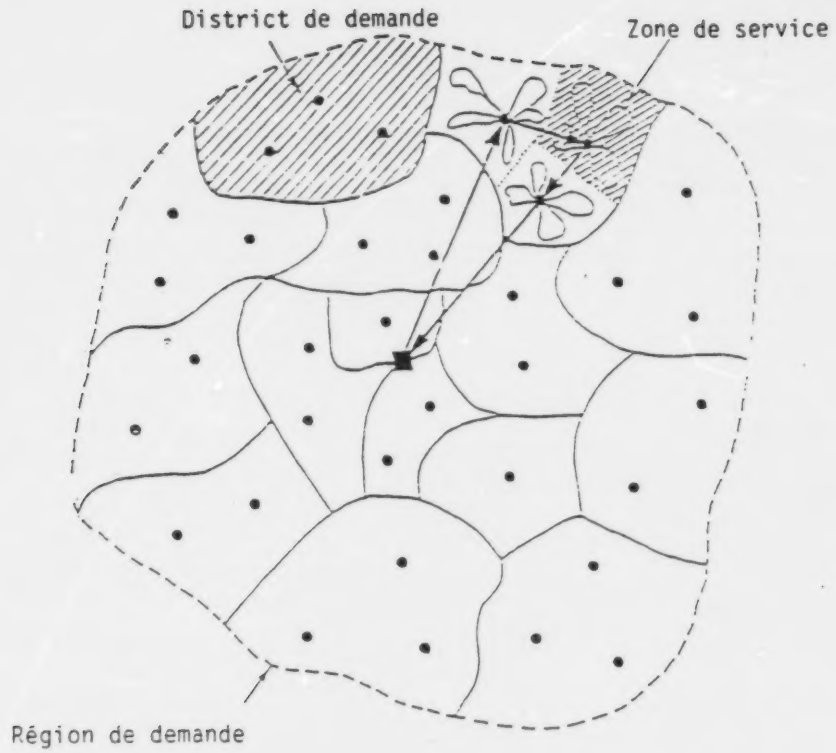
Tableau 2.2 : Index des types de problèmes et références (suite)

No	Type de problème	Références
P_9	Distribution "origines multiples-destinations multiples" avec terminaux de consolidation	Hall, 1984; Hall et Daganzo, 1984; Hall, 1987; Campbell, 1988.
P_{10}	Distribution "origines multiples-destinations multiples" avec inventaire et terminaux de consolidation	Daganzo, 1987c.

bande. Elle est représentée à la figure 2.3 où un district rectangulaire est partagé en deux bandes de même largeur. Dans chaque bande, le véhicule de livraison visite les points de demande d'une extrémité à l'autre sans retourner en arrière.

2.2.2.4 "Single-Strip Routing"

Cette stratégie est représentée à la figure 2.4 et consiste à considérer simplement une partie du district assez large mais deux fois plus longue que dans le cas du "Dual-Strip" et de même centre de gravité. La visite des points de demande ne s'effectue donc que sur l'aller et, le retour au dépôt se fait de l'autre bout de la bande, après avoir servi le client le plus éloigné.



Légende : ■ = centre de distribution

• = dépôt local dans une zone de service

→ = route de livraison en gros dans un district de service

⬭ = route de livraison locale dans une zone de service

Figure 2.1 : Découpage d'une région de demande

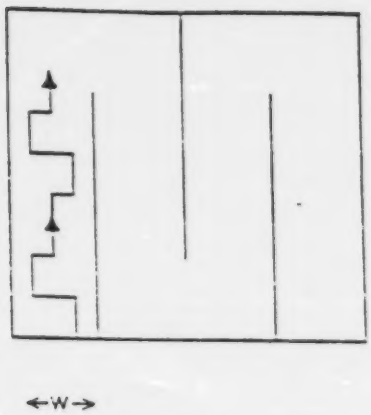
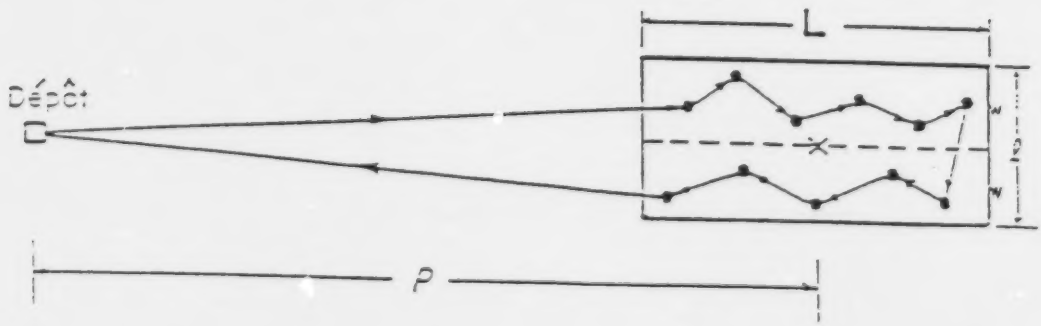


Figure 2.2 : La stratégie de bande de Daganzo (1984a)



Légende : —— = frontière du district

x = centre du district

→ = route du véhicule

• = point de demande

Figure 2.3 : "Dual-Strip Routing"

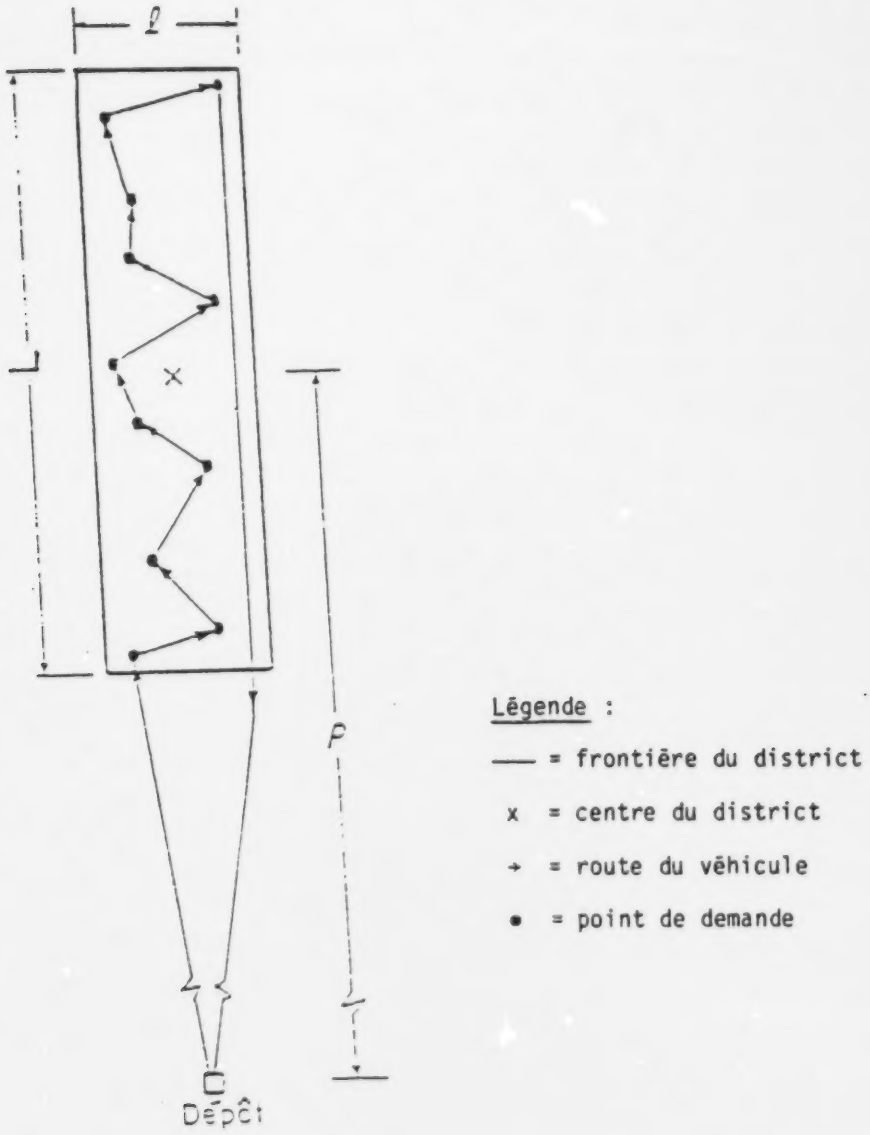
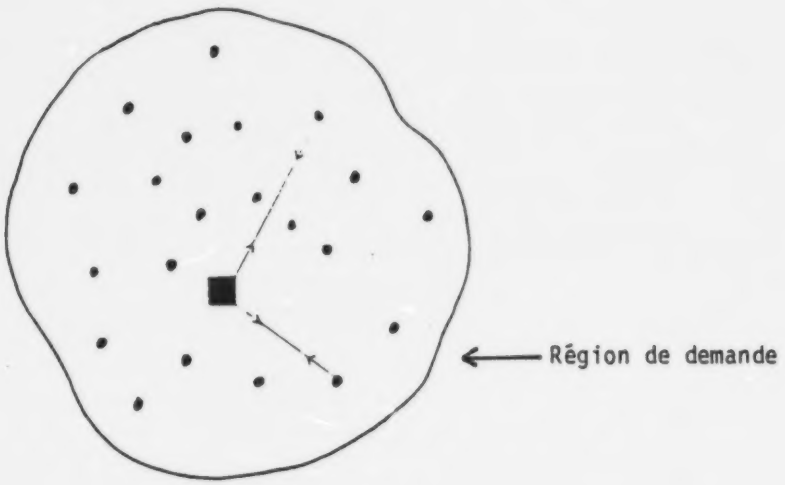


Figure 2.4 : "Single-Strip Routing"

2.2.2.5 La livraison directe ("Direct Shipping")

Cette stratégie est l'expédition directe des produits en lots séparés, du dépôt (ou fournisseur) à chaque client (figure 2.5). Cette stratégie peut également avoir des extensions dans les réseaux de distribution de marchandises incluant des terminaux (par exemple, livraison directe du dépôt central au terminal (de consolidation) et puis du terminal au client (voir Blumenfeld et al., 1985b).



Légende : • = client

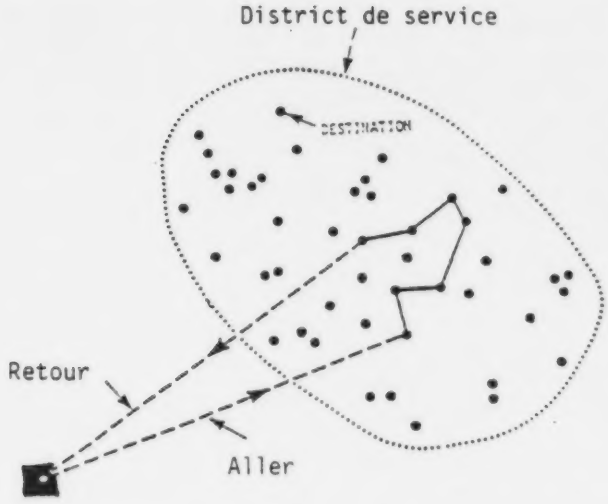
——— = route de livraison directe

▮ = dépôt (ou fournisseur)

Figure 2.5 : La livraison directe dans une région de demande

2.2.2.6 Le colportage ("Peddling")

La stratégie de colportage permet aux véhicules effectuant les livraisons d'articles dans des districts de visiter plus d'un client par "charge" (figure 2.6).



Légende : -- -- = route de navette

——— = route de livraison locale

▮ = dépôt (ou fournisseur)

Figure 2.6 : Le colportage avec ses étapes dans un district de service

2.2.2.7 Collecte ("Collecting")

Couramment utilisée dans l'analyse des problèmes d'approvisionnement et de distribution physique, cette stratégie consiste en un ramassage d'articles par des véhicules à partir de plusieurs fournisseurs à une seule destination/ou plusieurs destinations. Les figures 2.7 et 2.8 représentent cette stratégie dans les cas d'approvisionnement physique de type "origines multiples-destination unique" et de distribution physique de type "origines multiples -destinations multiples" respectivement.

2.2.2.8 Regroupement d'abord, construction des itinéraires ensuite ("Clustering-First, Route-Second")

On utilise également la stratégie dite "Regroupement d'abord, Construction des itinéraires ensuite", c'est-à-dire qu'on regroupe d'abord les points à visiter par un même véhicule et, ensuite, on confectionne des itinéraires pour chacun des véhicules.

2.3 Survol de principaux problèmes/modèles continus de logistique

Nous révisons dans ce paragraphe une dizaine de problèmes/modèles qui ont été étudiés dans le domaine de la logistique en utilisant des méthodes analytiques d'approximations continues.

Pour question de commodité et de présentation, nous regroupons les problèmes par objectif d'abord et, ensuite, à l'intérieur de chaque objectif, par ensemble de types de problèmes de même structure physique de base. En plus d'une description formelle accompagnant chaque problème, nous fournissons au tableau 2.3 les informations supplémentaires jugées importantes qui caractérisent le problème.

Nous rappelons au lecteur que presque la totalité des problèmes abordés touche la distribution, raison pour laquelle on n'aura pas de fonctions objectives différentes.

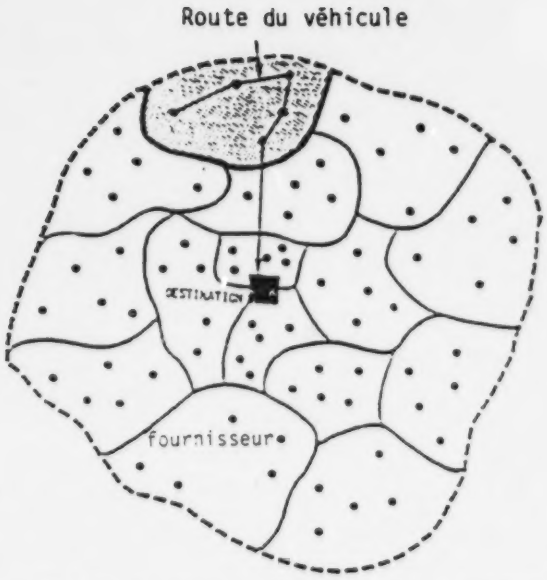


Figure 2.7 : Collecte dans un district d'approvisionnement pour un problème "origines multiples-destination unique"

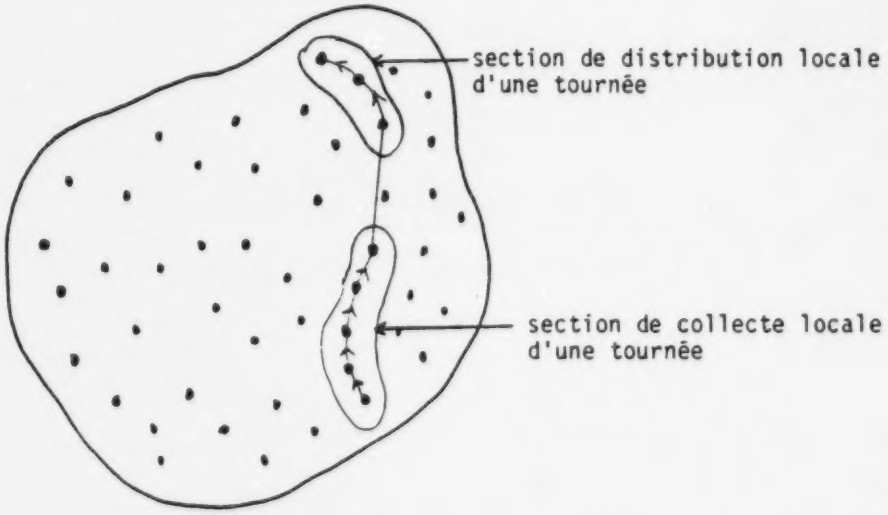


Figure 2.8 : Collecte et distribution d'articles dans une région de service pour un problème "origines multiples-destinations multiples" sans dépôt

Tableau 2.3 : Informations supplémentaires sur les problèmes

	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5	P_6	P_7	P_8	P_9	P_{10}
I. OBJECTIF	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
O_u/D_m	x	x	x	x	x					
O_m/D_u						x	x			
O_m/D_u								x	x	x
Autre										
II. VARIABLES DE DÉCISION	2,3,5	2,3	2,3	1,2	2,3,4,5,6	6,7	5,6	6,7	1,7	4,5,6
II. SYSTÈME DE PARAMÈTRES										
(1)	P,A	P	P	P	P,R	P	P	P	P,R	P,R
(2)	E,L_1	E,L_1	E,L_1	E,L_1	E,L_1	E	E	E	E,L_1	L_1
(3)					V			V		
(4)				D	D				D	D
(5)	F	I	I	F	F	F	F	F	F	F
(6)	N	C,N	N	N	N	N	N	N	N	N
(7)	1,2,4,6	1,2,6	1,4	3,4,7	3,4	5,7	5,6	1	3,7	5,7

Pour lire le tableau 2.3, on se réfèrera à la notation adoptée dans le tableau 2.1.

2.3.1 Minimisation de la distance moyenne (temps moyen) de parcours/du coût total

2.3.1.1 Problèmes de distribution "origine unique-destinations multiples" ("One-to-Many")

De nombreux modèles continus ont été développés pour des problèmes de distribution "origine unique-destinations multiples" avec des tournées de véhicules (P_1) dont l'objectif consiste à visiter, à partir d'un dépôt, les clients dispersés aléatoirement et/ou uniformément sur une région de demande pour minimiser la longueur totale des tournées ou le coût total de distribution.

Ainsi, Beardwood et al. (1959) ont développé une formule permettant d'approximer la longueur optimale D d'une tournée d'un commis-voyageur visitant N points distribués aléatoirement et uniformément dans une région de superficie A. L'approximation de la longueur d'une tournée est $K[AN]^{\frac{1}{2}}$ (avec N assez grand et K une constante).

Eilon et al. (1971) ont non seulement vérifié ce résultat par simulation et estimé la constante ($K \cong 0,75$), mais aussi développé d'autres formules analytiques exprimant des distances approximatives dans des problèmes de distribution de ce genre.

Les articles de Stein (1978a,b), partant du même résultat ci-haut, ont analysé la longueur de la tournée optimale d'un véhicule devant desservir N demandes ayant chacune une origine et une destination. L'auteur, ayant estimé la constante K approximativement égale à 0,765 par des simulations de Monte-Carlo, fait remarquer que lors d'une tournée sur N demandes la longueur optimale D est bornée inférieurement par $(2)^{\frac{1}{2}} K [AN]^{\frac{1}{2}}$ (longueur optimale d'une tournée de commis-voyageur sur 2N points) et supérieurement par $2K[AN]^{\frac{1}{2}}$ (longueur optimale d'une première tournée sur les N origines suivie d'une tournée sur les N destinations).

Larson et Odoni (1981) ont également vérifié la même formule d'approximation connue pour la longueur D d'une tournée optimale d'un véhicule donnnée par $K[AN]^{\frac{1}{2}}$ valable aussi bien pour les métriques euclidienne (où K = 0,765, voir Stein, 1978a) que pour L_1 (où K = 0,97, voir Jaillet et al., 1988) avec N > 15 et la surface suffisamment compacte et convexe.

Daganzo (1984a,b), se basant sur tous ces résultats précédents, a présenté une méthode systématique de routage appelée "stratégie de bande de Daganzo" (Daganzo, 1984a), permettant de déterminer une tournée quasi optimale dans des régions de formes différentes. Les résultats obtenus montrent que la largeur optimale de la bande w* est égale à $(3/\delta)^{\frac{1}{2}}$, valeur exacte pour la métrique L_1 mais approximative pour la métrique euclidienne (la valeur exacte est $w^* = (2,95/\delta)^{\frac{1}{2}}$). De plus, les distances moyennes entre les points sont données par $d^* = 1,15\ \delta^{-\frac{1}{2}}$ pour la métrique L_1 et $d^* = 0,90\ \delta^{-\frac{1}{2}}$ pour la métrique euclidienne où δ est la densité des points. Daganzo (1984b) a obtenu une formule approximative de la distance de parcours pour le problème de tournées de véhicules à partir d'un dépôt sous la stratégie de bande précédente. Chaque route contient une distance-navette pour atteindre la zone de livraison, une distance locale de parcours à l'intérieur de la zone et une distance-navette retournant à l'origine. Soit :

$\bar{\rho}$ = la distance moyenne de l'origine aux destinations;

δ = la densité d'arrêts;

C = le nombre de destinations visitées par lot;

D = la longueur d'une tournée avec la stratégie de bande.

Lorsque le nombre d'arrêts est grand, Daganzo a montré que sous certaines conditions générales, on a :

$$E(D) = 2\bar{\rho} + C(0,57\delta^{-\frac{1}{2}})$$

$$= D_1 + D_2$$

où E(•) représente l'espérance (moyenne), D_1 est la distance-navette et D_2 est la distance locale. Le lecteur intéressé par les recherches sur le problème de tournées de véhicules (VRP) avec des méthodes exactes pourra se référer à Bodin et al. (1983) ainsi qu'à l'article de Laporte et Nobert (1987).

Blumenfeld et Beckmann (1985a) ont analysé de leur côté les problèmes de distribution physique incluant le colportage ("peddling") en tenant compte des variations spatiales dans la densité et la demande des destinations. Leur modèle produit des expressions analytiques pour la longueur et le nombre d'arrêts des tournées des véhicules sous l'hypothèse que chaque tournée de véhicule recouvre tous les clients dans une région simplement connexe. Leurs résultats peuvent servir dans l'analyse des compromis entre les coûts de transport et d'inventaire reliés au colportage (par exemple, Burns et al., 1985).

Newell et Daganzo (1986a,b,c) ont proposé des méthodes approximatives facilitant l'étude de la planification stratégique en fonction de la distribution de la demande et permettant d'estimer notamment la forme de la zone de service couverte par un véhicule de capacité limitée.

Les zones planifiées, dans le cas d'une flotte de véhicules de capacité limitée, couvertes chacune par un véhicule prennent une forme approximativement rectangulaire et allongée vers la source. De plus, l'ensemble des zones sont disposées en anneaux concentriques. Les rayons des anneaux et le nombre de zones dans chaque anneau sont déterminés pour minimiser la distance totale parcourue par les véhicules et, à l'aide de la stratégie de bande de Daganzo (1984a) (ou encore du "Dual Strip Routing"), on obtient une approximation de la longueur des tournées dans chacune des zones. Il ressort de ces travaux que la largeur optimale de la bande dans une zone approximativement rectangulaire d'un anneau concentrique est égale

à $(3/2\delta)^{\frac{1}{2}}$ où δ est la densité (le nombre de points par unité de surface). Dans Newell et Daganzo (1986b), une analyse assez détaillée permet de conclure que la forme optimale et l'orientation des zones pour certains réseaux particuliers changent dans le cas de la métrique euclidienne.

L'article de Hall (1989) examine un problème de distribution dans le contexte "origine unique-destinations multiples" pour minimiser le coût de transport d'un ensemble de marchandises dépendant de deux facteurs: le nombre nécessaire de "charges" du véhicule et la longueur moyenne de la route par "charge". Le problème examiné consiste à analyser le compromis entre les objectifs duaux qui minimisent les deux facteurs sous certaines conditions restrictives.

Parfois, les livraisons peuvent être soumises à une contrainte de durée (P_2) pouvant déterminer le design des zones d'une région de demande. Ainsi, Han (1984) et Han et Daganzo (1986) ont étudié des stratégies optimales minimisant les coûts de distribution des produits périssables sans transbordement sous la contrainte de durée de livraison et la capacité du véhicule étant supposée assez grande. Les auteurs, ayant considéré et comparé deux stratégies à savoir "Dual Strip" et "Single Strip", ont révélé que la deuxième est meilleure sauf dans le cas où le district de service est proche du dépôt.

Sous une stratégie de type "groupement d'abord, construction des itinéraires ensuite" ("Cluster-First, Route-Second"), le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps (PTVFT) a été étudié par Daganzo (1987a,b; Langevin, 1988; Langevin et Soumis, 1989). Une journée de travail de durée T étant divisée en m périodes de temps, les fenêtres de temps sont modélisées en spécifiant la période pendant laquelle un client est visité par un véhicule. Les clients sont regroupés dans des zones de forme rectangulaire. Daganzo (1987a) fournit les dimensions optimales de ces rectangles

qui minimisent la distance parcourue par client et montre que cette distance augmente proportionnellement à $m^{\frac{1}{2}}$. Cet article fait remarquer également que cette augmentation devient plus importante si les articles transportés sont de petites dimensions plutôt que grandes. De plus, il établit une comparaison au point de vue efficacité de diverses stratégies de parcours des zones de livraison. Pour la situation concernant les fenêtres de temps non spécifiées pour tous les clients, Daganzo (1987b) a examiné diverses stratégies de distribution. L'auteur démontre qu'on obtient une distance de parcours minimal par client lorsqu'on traite les deux types de clients de façon différente. Quant à la méthode analytique mise au point par Langevin et Soumis (1989), elle permet le découpage des zones pour le PTVFT. Elle consiste à partitionner la région en zones approximativement rectangulaires et placées en anneaux concentriques autour du dépôt, chacune étant affectée à un seul véhicule, pour minimiser les coûts de transport d'une flotte de véhicules. La méthode détermine les dimensions optimales d'une zone en fonction de son éloignement du dépôt et de la densité de la demande dans cette région. Elle permet aussi, par un processus itératif, de déterminer les zones en partant de la périphérie d'une région vers le centre (où se trouve le dépôt). La construction des itinéraires de chacun des véhicules peut être faite en utilisant un algorithme du voyageur de commerce avec des contraintes de fenêtres de temps (voir Langevin, 1988).

Langevin (1989) propose une méthode interactive-graphique permettant au planificateur d'élaborer progressivement à l'écran des secteurs de livraison (affecté chacun à un véhicule), basée sur des formules analytiques. Celles-ci permettent de déterminer les dimensions optimales des secteurs de livraison en fonction de la vitesse des véhicules, de la densité de la demande (nombre de points à visiter), de l'éloignement du

secteur et, de la durée maximale d'une tournée ou du nombre maximum de points pouvant être visités.

Par ailleurs, les transbordements s'avèrent parfois nécessaires aux terminaux dans le cas où on utilise deux (ou plusieurs) types de véhicules pour minimiser le coût total de distribution sous une contrainte de durée (P_3). Les travaux de Han (1984) et Han et Daganzo (1989) ont abordé ce problème de distribution pour les produits non stockables et ont montré que la contrainte de durée entre la production et la livraison détermine largement le design du système de livraison. La région de service est partitionnée en districts contenant chacun des zones. Chaque zone contient un seul terminal (dépôt local) localisé au centre. Sous une stratégie de type "Dual-Strip", les techniques d'approximation utilisées permettent de découper chaque district, par conséquent, la région de service, en zones de forme presque optimale.

En l'absence de la contrainte de durée, on obtient un autre type de problème (P_4) étudié, d'une part, par Campbell (1989b), et Erlenkotter (1989) d'autre part. L'objectif principal du modèle de Campbell consiste à déterminer les localisations optimales et l'allocation optimale pour des nombres donnés de terminaux en minimisant le coût moyen de transport de distribution avec deux types de véhicules. L'auteur a analysé la livraison directe ("Direct Shipping") où les "véhicules régionaux" ("linehaul vehicles") transportent les "lots" séparés directement de l'origine à chaque terminal, et les véhicules locaux assurent les livraisons de "lots" séparés directement du terminal à chaque destination en faisant ainsi un seul arrêt pour livrer les articles. Ces articles fabriqués à l'origine sont identiques pour toutes les destinations de même demande. L'auteur a examiné également les hypothèses simplificatrices de localiser les terminaux au centre des régions de même grandeur et de traiter une demande à partir du terminal le plus proche.

Quant au modèle "GOMA" ("General Optimal Market Area Model") présenté par Erlenkotter, il met en relief une revue assez étoffée de modèles décrivant le compromis fondamental entre les économies d'échelle provenant de larges installations de service (dépôts ou terminaux) et les coûts élevés de transport aux marchés plus éloignés. L'auteur a exploré également l'utilisation de GOMA pour approximer des modèles de grande taille de programmation en nombres entiers et fournit, en outre, une liste de références pertinentes.

Enfin, l'article de Rosenfield et al. (1989) développe un modèle analytique permettant de déterminer le nombre optimal de "zones" de service (ou le nombre optimal d'installations de service) en étudiant le compromis entre les coûts de livraison et d'installations de service (dépôts). De plus, il présente quelques applications du modèle.

Les problèmes de distribution "origine unique-destinations multiples" avec inventaire (P_5) ont pour objectif de minimiser le coût total et ce, en analysant des interdépendances et compromis de coûts reliés aux différentes composantes logistiques. Cette analyse peut permettre de déterminer la structure presque optimale des réseaux de distribution physique. Ainsi, Clarens et Hurdle (1975) et Burns, Hall, Blumenfeld et Daganzo (1985) ont préféré, pour ce genre de problèmes, optimiser simultanément les routes de véhicule et la fréquence d'expédition pour établir le compromis entre les coûts de transport et d'inventaire. Ces auteurs ont donc examiné le cas avec un nombre optimal de districts et de véhicules par district, mais le nombre d'arrêts par unité de surface était supposé connu pour Clarens et Hurdle tandis que le nombre d'arrêts par tournée de véhicule était supposé connu pour Burns et al. Ces derniers ont procédé par une analyse et une comparaison de deux stratégies : livraison directe ("Direct Shipping") et colportage ("Peddling") dont les résultats

révèlent que le colportage est meilleur que la livraison directe lorsque les articles sont de valeur. On retiendra que le modèle de Clarens et Hurdle développé pour un système de bus de transport en commun partant d'un terminal central vers les destinations dispersées sur la ville et sa banlieue s'applique sans modifications aux problèmes de distribution physique à partir d'un dépôt à un ensemble fixé de points de vente.

De même, le modèle de Banks, Driscoll et Stanford (1982), essentiellement une extension de l'approche de Clarens et Hurdle, permet aussi d'évaluer en même temps les coûts de transport et du temps de parcours associés à un système de transport de passagers. Les auteurs ont donc étudié aussi le cas avec un nombre optimal de véhicules et de districts et ont supposé que chaque passager transporté exige un arrêt. Ils ont supposé néanmoins que, à l'intérieur de chaque district, la distribution ne suit pas une stratégie de routage efficace ce qui, en revanche, affecte la configuration utilisée.

Daganzo et Newell (1985) ont étudié le même cas que précédemment sous une stratégie de routage différente et supposent que chaque article demande un arrêt. Ces auteurs ont montré à quel point la nature des objets transportés joue sur la configuration optimale du système de distribution et sur les coûts de distribution globale et leurs résultats constituent une application directe du modèle de Clarens et Hurdle.

Dans un autre article, Daganzo et Newell (1986) ont proposé une méthode souple d'approximation pour la planification des systèmes de distribution avec plusieurs transbordements en vue de minimiser les coûts de transport plus le coût d'inventaire. La méthode proposée permet de diviser la région de service en secteurs desservis par un unique dépôt.

Alors que le nombre de transbordements augmente avec la distance à partir de l'origine, les destinations très proches de l'origine sont servies sans transbordements. D'où une hiérarchie de terminaux avec plus de niveaux sur les grandes distances. Plutôt que de fournir une solution unique, cette méthode présente quelques caractéristiques essentielles pour une solution presque optimale.

Sous certaines conditions, Daganzo (1988b) a examiné les systèmes de distribution de marchandises pour les mêmes problèmes "d'origine unique-destinations multiples". L'auteur a comparé deux approches de consolidation de marchandises pour réduire les coûts de transport et d'inventaire : consolider les marchandises dans les véhicules (i.e. aucun transbordement) en utilisant le colportage et utiliser une autre stratégie en permettant les transbordements aux dépôts locaux. Il en résulte que, sous certaines conditions bien spécifiées, les transbordements ne sont pas nécessaires sauf pour les systèmes de distribution "origines multiples-destinations multiples" (voir Daganzo, 1987c).

L'analyse des compromis entre les coûts de transport, d'inventaire et de production sur les réseaux de distribution de marchandises a été suffisamment illustrée dans un excellent article de Blumenfeld, Burns, Diltz et Daganzo (1985b). L'objectif étant de déterminer les stratégies optimales d'expédition de marchandises (i.e. routes et capacités des véhicules), les auteurs ont considéré des réseaux comprenant la livraison directe, la livraison en passant par un terminal de consolidation et, enfin, la combinaison des deux stratégies précédentes. Les compromis entre les coûts de transport et d'inventaire sont analysés à l'aide des méthodes standards "Economic Order Quantity" (EOQ) (Arrow, Karlin et Scarf, 1958; Magee et Boodmann, 1967) pour justifier les coûts de transport, d'inventaire (des charges à bord/en transit) et les capacités des véhicules. La

production coordonnée et indépendante et la planification du transport sont toutes les deux analysées sous les trois stratégies. Le modèle obtenu ne tient pas compte des coûts fixes d'opération et de construction du dépôt ou de contraintes de capacité du dépôt. Ce modèle est aussi un outil utile au niveau de la planification logistique.

Le compromis entre les coûts de transport et d'installations de service (par exemple, dépôts ou terminaux, etc.) a été également bien exploré en utilisant des modèles continus (voir Erlenkotter, 1989). Cependant, dans un contexte global, Campbell (1989a) a développé un modèle analytique incorporant à la fois les coûts de transport, d'inventaire et du terminal pour le problème de distribution "origine unique-destinations multiples", en utilisant deux types de véhicules. L'auteur a analysé deux types de compromis à la fois : entre les coûts de transport et d'inventaire, et entre les coûts de transport et du terminal. La région de service étant partitionnée en districts contenant chacun un terminal, les véhicules régionaux assurent la livraison en gros directement de l'origine aux terminaux tandis que les véhicules locaux effectuent les livraisons locales des terminaux aux destinations. Ces livraisons locales suivent les routes du colporteur ("Peddling Route") avec des arrêts aux diverses destinations. Le modèle obtenu permet de déterminer le nombre optimal des terminaux et le nombre d'arrêts pour les véhicules locaux minimisant le coût total de distribution.

2.3.1.2 Problèmes de collecte "origines multiples-destination unique" ("Many-to-One")

Quoique la plupart du temps les modèles obtenus pour les problèmes "origine unique-destinations multiples" s'appliquent aisément aux problèmes "origines multiples-destination unique" (par exemple, Burns, Hall, Blumenfeld et Daganzo, 1985; Campbell, 1989b), il existe certains modèles développés spécifiquement pour des problèmes de collecte de plusieurs fournis-

seurs ou sources à une seule destination (P_6) tels que usine, dépôt ou terminal, station de service, etc. Le modèle de Daganzo, Hendrickson et Wilson (1977) est un des premiers de ce genre et fournit, comme le souligne Bélisle (1989), une estimation des temps de route et d'attente moyens d'un usager d'un système où le véhicule de service visite périodiquement un lieu fixe correspondant à la destination commune (où à l'origine commune selon le cas) de tous les déplacements effectués dans la zone de service. Ce modèle permet de déterminer à quelle fréquence le véhicule doit visiter le lieu fixe afin que le temps total moyen d'un usager dans le système soit minimisé.

Par ailleurs, le problème de collecte peut inclure non seulement l'inventaire des charges à bord mais aussi être soumis à une contrainte de durée associée à l'intervalle d'expédition des véhicules effectuant la collecte (P_7). Ainsi, les modèles de Daganzo (1985) et Hall (1985b) ont été développés dans ce contexte. Le premier a pour objectif de minimiser les coûts associés au transport d'articles hétérogènes fournis à une destination commune. Ce modèle permet de déterminer le nombre optimal des systèmes de transport et l'allocation des fournisseurs individuels à chaque système. Le deuxième, se basant sur les résultats du premier modèle, vise à déterminer la fréquence optimale d'expédition de véhicules lorsqu'un grand nombre de fournisseurs hétérogènes est plus visité qu'un petit nombre de fournisseurs hétérogènes pour minimiser les coûts associés à la collecte.

2.3.1.3 Problèmes de distribution "origines multiples-destinations multiples" ("Many-to-Many")

Le peu de littérature sur les problèmes de distribution "origines multiples-destinations multiples" (P_8) présage sans doute de la difficulté de ceux-ci au niveau de la résolution . Le premier modèle de ce genre relève de Daganzo (1978). L'auteur étudie, sous certaines hypothèses, trois

stratégies de routage et évalue pour chacune d'elles les temps de route et d'attente moyen d'un usager quand la zone de service est desservie par m véhicules. Dans le même cadre d'idées, Bélisle (1989) propose des modèles d'approximation analytique permettant d'estimer le temps de service moyen d'un usager d'un système de transport porte-à-porte sous différentes stratégies de routage dans une zone de service supposée rectangulaire.

L'utilisation des terminaux pour fin de consolidation des marchandises dans les réseaux de logistique de type "origines multiples-destinations multiples" permet effectivement de minimiser la distance moyenne de parcours (P_9) ou le coût total moyen incluant le coût d'inventaire (P_{10}). La littérature fournit quelques modèles développés dans ce sens (Hall, 1984, 1987; Daganzo, 1987c) où les marchandises peuvent être transportées en passant par un seul terminal le plus proche ("One-Terminal-Closest") de l'origine ou destination, ou en passant par deux terminaux les plus proches ("Two-Terminals-Closest") de l'origine et de la destination. Cette procédure crée le phénomène de retour des marchandises au terminal le plus proche quand il n'est pas localisé dans la même direction que la destination.

Le modèle présenté par Hall (1984) permet d'analyser le compromis entre la distance moyenne de parcours et le nombre de terminaux pour les deux stratégies de routage précédentes en utilisant la métrique L_1 ("Rectangular Grid"). Ce modèle montre qu'une augmentation du nombre de terminaux fait décroître lentement la distance moyenne de parcours et cette diminution ne dépasse pas plus du tiers.

Par ailleurs, Hall et Daganzo (1984), Daganzo (1987c) et Hall (1987), n'utilisant que la métrique L_1 et supposant que les terminaux sont localisés aux centres des régions de même grandeur, ont examiné des stratégies de routage dont le phénomène de retour des marchandises n'est pas nécessaire mais plutôt l'acheminement des marchandises en passant par les

terminaux proches de l'origine et/ou destination ("best-nearby") minimisant la distance de parcours.

Finalement, Campbell (1988), se basant sur les travaux précédents, a analysé trois stratégies de routage pour le transport de marchandises en passant par les terminaux de consolidation pour minimiser le coût de transport dans le même type de réseau logistique. Dans ce modèle, les marchandises sont premièrement transportées sur un véhicule local de l'origne au terminal, ensuite sur un véhicule de navette entre terminaux et, en fin, sur un véhicule local du terminal à la destination et ce, en visitant au moins un terminal pour assurer la consolidation. La consolidation favorise enfin de compte un transport fortement efficace entre terminaux.

2.4 Méthodes de résolution

Les méthodes de résolution utilisées pour résoudre certains problèmes de logistique bien spécifiés peuvent être divisées en deux parties : on retrouve d'une part des méthodes exactes permettant d'obtenir des résultats numériques à ces problèmes et, d'autre part, des méthodes analytiques basées sur des approximations continues.

Les travaux mentionnés dans cette revue de littérature ont été développés en utilisant des méthodes analytiques qui, par leur simplicité, permettent au planificateur de prendre les décisions qui s'imposent. Ainsi, en face des problèmes difficiles à résoudre avec des méthodes exactes (problèmes d'optimisation non convexes ou non linéaires, par exemple), on utilise les méthodes analytiques car, en ce qui concerne les problèmes de logistique, la demande n'est pas supposée être discrète. Parfois, ce sont des approximations qui facilitent l'analyse des problèmes et un certain sens de jugement critique humain s'avère indispensable pour l'interprétation des résultats.

Nous n'entrerons pas dans les détails pour décrire l'"astuce" utilisée pour développer chaque modèle continu de logistique présenté dans la section précédente.

Nous retiendrons cependant que les méthodes analytiques sont actuellement utilisées pour analyser certains problèmes de logistique et englobent en général trois champs d'intérêts non exclusifs (Transpn. Res.-A, 19A, p.382, 1985) consistant à :

1. développer des outils nécessaires permettant d'analyser des systèmes intégrés de logistique (par exemple, Blumenfeld, Burns, Diltz et Daganzo, 1985b);

2. développer des outils n'exigeant pas beaucoup de données et de qualité robuste (par exemple, Daganzo, 1984a,b Blumenfeld et Beckmann, 1985a);

3. étendre des approximations continues aux problèmes discrets (par exemple, Erlenkotter, 1989).

2.5 Conclusion

Nous avons essayé de présenter les principaux modèles continus développés au cours de ces trois dernières décennies pour analyser les problèmes de logistique. Cette vue d'ensemble sur ces travaux nous a montré l'état d'avancement des recherches dans le domaine de modélisation continue et ouvre la voie à de nombreuses recherches en perspective.

CHAPITRE TROISIÈME

UN PROBLÈME DE COLLECTE DE LAIT FRAIS AVEC CONTRAINTES TEMPORELLE ET DE CAPACITÉ

Nous étudions dans ce chapitre un problème de collecte de lait frais chez plusieurs fournisseurs d'une région approvisionnant une usine laitière située au centre de cette région.

La collecte de lait s'effectue une fois par jour à l'intérieur d'une période de temps fixe avec des camions de capacité limitée. Chaque camion est affecté à une zone de la région où il doit effectuer sa collecte puis retourne à l'usine (ou dépôt) pour la livraison sans dépasser la durée maximale prévue pour cette activité.

Nous développons une méthode analytique permettant un découpage presque optimal de la région de collecte en zones pour minimiser le coût total par unité de charge transportée incluant les coûts d'opération des camions et les coûts fixes d'arrêts chez les fournisseurs.

3.1 Introduction

Nous examinons le problème de collecte de lait frais où chaque camion de capacité limitée, s'étant rendu à la zone qui lui est assignée pour y effectuer la collecte, doit, dans une période de temps fixe, ramasser la quantité de lait frais disponible et revenir à l'usine (ou dépôt) pour livraison (i.e. la période de temps fixe débute avec la visite du premier fournisseur et se termine avec la livraison à l'usine).

Ainsi, notre problème est l'un des problèmes d'approvisionnement "origines multiples-destination unique" ("Many-to-One") avec contraintes temporelle et de capacité ou l'inverse, i.e. distribution physique "origine unique-destinations multiples" ("One-to-Many") sans transbordement sous les mêmes contraintes.

Il existe dans la littérature un certain nombre d'auteurs qui ont présenté des modèles continus de logistique pour les problèmes "origine unique-destinations multiples" avec capacité fixe du camion (Burns, Hall, Blumenfeld et Daganzo, 1985; Newell et Daganzo, 1986a) ou avec une contrainte temporelle (Han, 1984; Han et Daganzo, 1986; Langevin, 1988; Langevin et Soumis, 1989). Daganzo (1985) et Hall (1985b) ont analysé des problèmes d'approvisionnement "origines multiples-destination unique" avec capacité fixe.

Cependant, tous ces travaux n'ont pas, à notre connaissance, traité les problèmes précédents en combinant à la fois les contraintes temporelle et de capacité plus spécifiquement dans un contexte d'approvisionnement ou de distribution physique de produits périssables (sauf Han (1984) qui tient seulement compte de la contrainte temporelle et mentionne néanmoins l'impact de la capacité sans faire une étude approfondie).

Dans le souci de rendre plus compréhensive notre analyse, nous supposons que la région de collecte est circulaire avec l'usine (ou dépôt) située au centre et les fournisseurs distribués aléatoirement dans la région avec une densité uniforme.

Notre modèle présente certaines analogies avec ceux de Newell et Daganzo (1986a) et de Langevin et Soumis (1989) en ce qui concerne la géométrie et les divisions en anneaux concentriques. Chaque anneau est divisé en zones avec un camion par zone. Les premiers auteurs examinent le design des zones lorsque les camions ont des limites de capacité tandis que que les derniers se basent sur la contrainte temporelle (une contrainte par anneau) pour déterminer la grandeur des zones, la densité des clients étant considérée variable (elle décroît graduellement du centre vers la périphérie).

Notre approche complète en effet les travaux précédents et se rapproche plus précisément de l'article de Han et Daganzo (1986) qui analyse un problème de distribution de produits périssables sous la contrainte temporelle en admettant tout le temps que la capacité du camion est suffisamment grande.

En traitant à la fois les contraintes temporelle et de capacité, nous déterminons la grandeur presque optimale des zones où la densité des fournisseurs demeure constante en examinant minutieusement les situations différentes pouvant survenir.

3.2 Modèle analytique

Le découpage d'une région en plusieurs districts de façon optimale pour obtenir un coût minimum de service dans toute la région s'avère souvent une tâche difficile. Han et Daganzo (1986) précisent néanmoins deux propriétés essentielles qui caractérisent une partition idéale d'une région en districts dans le cas de distribution (ou approvisionnement) de produits périssables qu'il faudrait s'efforcer de remplir :

(1) La partition doit être réalisable; tous les districts doivent se "coller" convenablement, couvrir toute la région et chacun doit être couvert en une période de temps fixe (T).

(2) Pour chaque district, la grandeur du district (ou encore la grandeur (A) de la zone) et le facteur de minceur (β) sont tous les deux optimaux (où β= largeur divisée par la longueur pour une zone rectangulaire de superficie A).

Nous considérons, pour être cohérents avec les propriétés précédentes, une région circulaire de rayon R découpée suivant des zones approximativement rectangulaires et allongées vers le centre où se trouve le dépôt. Cette façon de découper les zones telle que proposée par Langevin et Soumis (1989) fournit un ensemble de zones disposées en anneaux concentriques (figure 3.1).

3.2.1 Formulation du modèle analytique

Nous supposons que, dans un anneau donné, chaque zone approximativement rectangulaire (sauf l'anneau central) a les côtés L (longueur) et ℓ (largeur) comme l'indique la figure 3.2, où la distance entre le dépôt et le centre de gravité de la zone est ρ (avec $\rho > L/2$).

Nous supposons également que les fournisseurs sont uniformément distribués dans la région de collecte dont chaque zone est couverte par un seul camion de capacité fixe. Posons

δ = densité de fournisseurs (fournisseurs/km^2);

q = production journalière moyenne de lait par fournisseur (litres/fournisseur);

Q = capacité maximale du camion (litres);

V = vitesse du camion (km/heure);

T = durée maximale de collecte dans une zone (heures);

t = temps moyen fixe de manutention par fournisseur (heures/fournisseur);

C = coût d'opération du camion ($/km);

C_o = coût fixe par arrêt chez un fournisseur i.e. coût associé à la manutention tel que chargement, etc. ($/fournisseur);

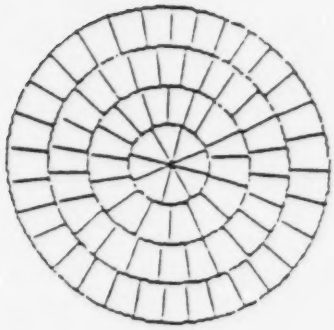


Figure 3.1 : Découpage d'une région circulaire en zones

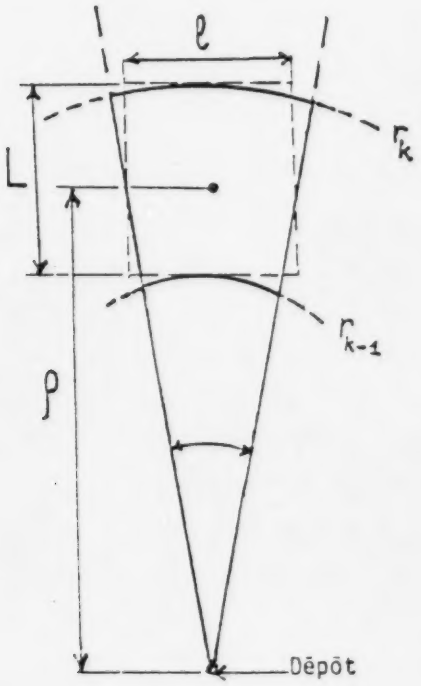


Figure 3.2 : Une zone de collecte dans un anneau de rayons intérieur r_{k-1} et extérieur r_k.

Les variables de décision sont

A_k = aire de la zone de collecte dans le $k^{ième}$ anneau (km^2);

N_k = nombre de zones de collecte dans le $k^{ième}$ anneau.

Il faut donc déterminer les rayons intérieur et extérieur de chaque anneau ainsi que le nombre de zones (= nombre de camions couvrant l'anneau) qui le composent.

Nous formulons le modèle général pour une région toute entière et effectuons une analyse du modèle pour une seule zone d'un anneau donné. Nous terminons par un algorithme de solution du modèle général.

Daganzo (1984b) montre que, dans le cas de la métrique euclidienne, la longueur d'une route dans une zone du $k^{ième}$ anneau en utilisant le "dual-strip routing" peut être approximée par

$$D_k \tilde{=} 2\,\rho_k + m_k\,\delta^{-1/2}\,\phi(x),\ \rho_k > L/2 \qquad (3.1)$$

où

$$\phi(x) = \frac{x^{1/2}}{6} + \frac{1}{x^{1/2}}\left\{\frac{4}{(\frac{x}{4})^2}\left[(1+\frac{x}{4})\ln(1+\frac{x}{4}) - \frac{x}{4}\right] - 1\right\} \qquad (3.2)$$

avec

$x = \delta\ell^2$ (i.e. le nombre de points dans un carré de côté ℓ) et

m_k = le nombre de points dans une zone du $k^{ième}$ anneau.

Si nous remplaçons m_k par $\delta\, A_k$ dans (3.1), nous obtenons

$$D_k \tilde{=} 2\,\rho_k + \delta^{1/2} A_k\,\phi(x),\ \rho_k > L/2 \qquad (3.3)$$

La fonction objectif du modèle général (i.e. pour toute la région) s'écrit

$$\text{Min } Z = \sum_k \left[\frac{2\, C\, \rho_k}{\delta\, q\, A_k} + \frac{C\, \delta^{-\frac{1}{2}}}{q}\ \phi(x) + \frac{C_o}{q} \right] N_k \qquad (3.4)$$

où, pour chaque zone du $k^{\text{ième}}$ anneau, le premier terme entre les crochets désigne le coût d'opération du camion par unité de charge transportée sur la distance de navette, le deuxième terme représente le coût d'opération du camion par unité de charge transportée sur la distance de parcours à l'intérieur d'une zone de collecte et le troisième terme fournit le coût fixe d'arrêts par unité de charge transportée chez les fournisseurs.

Le coût total par unité de charge transportée dans une zone de collecte d'un anneau donné décroît, pour x et ρ fixés, si l'on augmente A; il est donc préférable que A soit choisi le plus grand possible dans de telles conditions.

Nous utilisons le "dual-strip routing" pour effectuer la collecte (voir section 2.2.2.3) dans chaque zone d'un anneau. Chaque camion doit respecter la contrainte temporelle à partir de la visite du premier fournisseur dans la zone de collecte où il est affecté jusqu'à son retour au dépôt.

De plus, le camion possède une capacité limitée; la production journalière de tous les fournisseurs d'une zone ne doit donc pas excéder la capacité maximale du camion.

Les deux contraintes précédentes doivent être à la fois respectées. Si nous supposons que la distance entre le premier fournisseur et la frontière de la zone de collecte est négligeable, la distance de navette à l'aller peut être approximée par

$$\rho_k - L/2 = \rho_k - \frac{\delta^{\frac{1}{2}} A_k}{2\ x^{\frac{1}{2}}} \qquad (3.5)$$

Ainsi, la contrainte temporelle dépend de la longueur totale d'une tournée dans une zone [voir (3.3)] moins la distance de navette à l'aller [voir (3.5)], ce qui s'exprime par

$$D_k - \left(\rho_k - \frac{\delta^{\frac{1}{2}} A_k}{2x^{\frac{1}{2}}}\right) = \rho_k + \delta^{\frac{1}{2}} A_k \left[\phi(x) + \frac{1}{2x^{\frac{1}{2}}}\right], \quad \rho_k > L/2$$

$$= \rho_k + \delta^{\frac{1}{2}} A_k\ \Psi(x), \quad \rho_k > L/2 \qquad (3.6)$$

où

$$\Psi(x) = \phi(x) + \frac{1}{2\ x^{\frac{1}{2}}} \qquad (3.7)$$

La contrainte temporelle s'écrit, pour chaque anneau,

$$\frac{\rho_k + \delta^{\frac{1}{2}} A_k\ \Psi(x)}{V} + \delta\ A_k\ t \leq T \qquad (3.8)$$

La contrainte de capacité s'exprime par

$$\delta\ A_k\ q \leq Q \qquad (3.9)$$

Étant donné que, dans un anneau donné, pour x et ρ fixés, on peut prendre A le plus grand possible, (3.8) ou (3.9) est active ou encore les deux en même temps.

Nous allons examiner les différentes possibilités en restreignant le modèle général à une zone de collecte d'un anneau donné. Nous proposerons

ensuite un algorithme permettant de résoudre le modèle général. Dans la suite, l'indice k (pour un anneau) est omis pour question de commodité (ρ_k et A_k deviennent respectivement ρ et A).

3.2.2 Résolution du modèle analytique

Dans une zone de collecte d'un anneau donné, le modèle s'écrit

$$\text{Min } Z_0 = \frac{2\,C\,\rho}{\delta\,q\,A} + \frac{C\,\delta^{-\frac{1}{2}}}{q}\,\phi(x) + \frac{C_0}{q} \qquad (3.10)$$

s.c.

$$\rho + \delta^{\frac{1}{2}} A\left[\psi(x) + \delta^{\frac{1}{2}} t\,V\right] \leq TV \qquad (3.11)$$

$$\delta\,q\,A < Q \qquad (3.12)$$

De plus, on suppose que $\rho > L/2$. Les contraintes (3.11) et (3.12) peuvent s'écrire

$$A < \frac{T\,V - \rho}{\delta^{\frac{1}{2}}\left[\psi(x) + \delta^{\frac{1}{2}} t\,V\right]} \qquad (3.11a)$$

$$A < \frac{Q}{\delta\,q} \qquad (3.12a)$$

Avant de faire l'analyse du modèle précédent, nous devons fournir certaines précisions qui différencient notre approche de celle de Han et Daganzo (1986). Dans le modèle de Han et Daganzo (1986), développé pour un problème de distribution de produits périssables, la capacité du camion est supposée assez grande. Tant que la contrainte de durée de livraison est respectée, le poids (ou le volume) total des produits transportés ne peut pas atteindre la capacité maximale du camion. Ce modèle compare deux stratégies : "Dual strip routing" (voir figure 2.3) et "Single strip routing" (voir figure 2.4). Leurs résultats recommandent d'utiliser la stratégie de

"Dual strip routing" dans les zones proches du dépôt tandis que celle de "Single strip routing" dans les zones éloignées du dépôt.

Dans notre modèle, nous utilisons le "Dual strip routing" et analysons le problème de collecte de lait frais (produit périssable) en admettant que le camion peut être rempli jusqu'à sa capacité maximale pourvu que la durée fixe de collecte soit respectée. De là, la situation décrite par Han et Daganzo (1986) est comprise dans notre modèle lorsqu'on considère (3.11a) active avec (3.12a) satisfaite. Nous présentons ci-après trois cas possibles :

3.2.2.1 Cas 1 : la contrainte de capacité (3.12a) saturée

Si la contrainte de capacité (3.12a) est saturée et (3.11a) remplie, on peut déterminer la grandeur de la zone. On a, d'après (3.12a),

$$A = \frac{Q}{\delta q} \tag{3.13}$$

Soit Z_1, dans ce cas, le coût total par unité de charge transportée dans une zone de collecte. En remplaçant (3.13) dans (3.10), Z_0 est égal à Z_1. Pour ρ fixé avec $\rho > L/2$, Z_1 en fonction de x s'écrit

$$Z_1(x) = \frac{2C\rho}{Q} + \frac{C\delta^{-1/2}}{q}\,\phi(x) + \frac{C_0}{q} \tag{3.14}$$

Étant donné que $\phi(x)$ est une fonction décroissante qui atteint son optimum pour $x^* = 6{,}70$ avec $\phi(x^*) \cong 0{,}57$ (Daganzo, 1984b), pour ρ fixé, $Z_1(x)$ est donc minimisée. Posons $x^* = x_1 = 6{,}70$. Dans ce cas, la largeur optimale de la zone de collecte est donnée par

$$\ell^* = \left(\frac{x_1}{\delta}\right)^{1/2}$$

$$= \left(\frac{5{,}70}{\delta}\right)^{1/2} \tag{3.15}$$

On a alors

$$Z_1(x_1) = \frac{2\,C\,\rho}{Q} + \frac{0{,}57\,\delta^{-1/2}C + C_0}{q} \qquad (3.16)$$

3.2.2.2 Cas 2 : Les deux contraintes (3.11a) et (3.12a) saturées

Si (3.11a) et (3.12a) sont saturées, nous avons les membres droits de (3.11a) et (3.12a) égaux. Pour x fixé, on peut déterminer le ρ correspondant. Comme (3.12a) est saturée, pour ρ fixé la fonction objectif $Z_1(x)$ est minimisée pour $x^* = x_1 = 6{,}70$ et sa valeur est donnée par (3.16).

Posons ρ_c comme étant la distance du dépôt au centre de la zone de l'anneau dans lequel les contraintes (3.11a) et (3.12a) sont saturées à la fois. D'après ce qui précède, $Z_2(x^*)$, avec $x^* = x_1 = 6{,}70$, représente la valeur de la fonction objectif correspondant à la contrainte (3.11a) saturée pour $\rho = \rho_c$. Il est clair que x_1 n'est pas l'optimum de $\Psi(x)$. On obtient

$$Z_2(x^*) = \frac{2\,C\,\left[\delta^{1/2}t\,V + \Psi(x^*)\right]\rho_c}{\delta^{1/2}q\,(TV - \rho_c)} + \frac{0{,}57\,\delta^{-1/2}\,C + C_0}{q} \qquad (3.17)$$

où

$$\Psi(x^*) = \Psi(x_1) \cong 0{,}77 \qquad (3.13)$$

Ainsi, $Z_1(x^*) = Z_2(x^*)$ pour $x^* = 6{,}70$ et $\rho = \rho_c$. De là, il est possible et particulièrement important de préciser la distance ρ_c à l'aide des expressions (3.15) et (3.17) et on obtient

$$\rho_c = TV - \frac{\left[0{,}77 + \delta^{1/2}t\,V\right]Q}{\delta^{1/2}q} \qquad (3.19)$$

avec $\rho_c > L/2$

3.2.2.3 Cas 3 : La contrainte temporelle (3.11a) saturée

Si la contrainte temporelle (3.11a) est saturée, on peut déterminer la grandeur de la zone pour minimiser le coût total par unité de charge transportée. Cette situation survient lorsque $\rho_c < \rho < TV$. C'est-à-dire que le camion n'est pas rempli jusqu'à sa capacité maximale.

Ainsi, pour x fixé, on obtient

$$A(x) = \frac{TV - \rho}{\delta^{\frac{1}{2}} \left[\psi(x) + \delta^{\frac{1}{2}} t\, V \right]} \qquad (3.20)$$

L'objectif correspondant $Z_3(x)$ s'écrit

$$Z_3(x) = \frac{C_o + C\, g\, t\, V}{q} + \frac{C\, \delta^{-\frac{1}{2}}}{q} \left[\phi(x) + g\, \psi(x) \right] \qquad (3.21)$$

où

$$g = \frac{2\,\rho}{TV - \rho} \quad , \rho_c < \rho < TV \qquad (3.22)$$

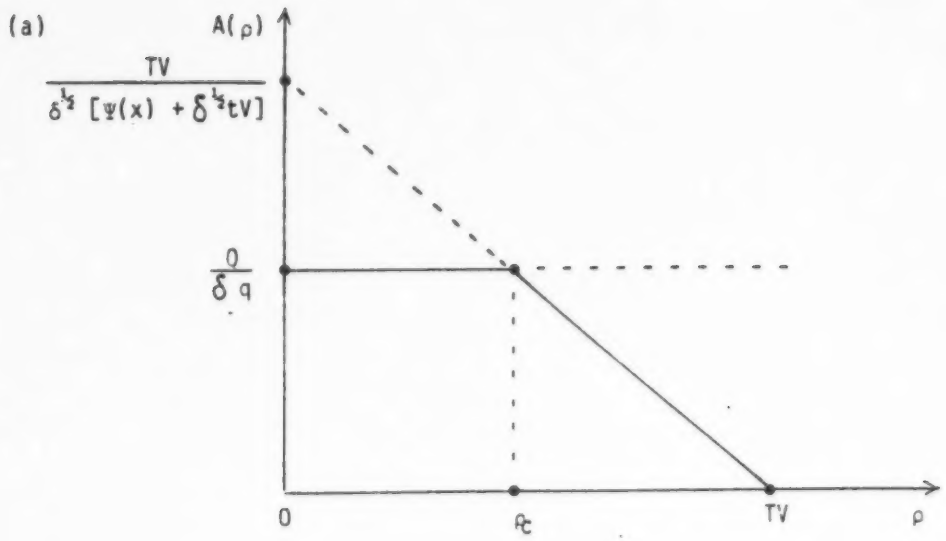
Posant

$$f(x) = \phi(x) + g\, \psi(x) \quad , g_c = \frac{2\rho_c}{TV - \rho_c} < g < \infty \qquad (3.23)$$

L'expression (3.21) devient

$$Z_3(x) = \frac{C_o + C\, g\, t\, V}{q} + \frac{C\, \delta^{-\frac{1}{2}}}{q}\, f(x), \; g_c < g < \infty \qquad (3.24)$$

Nous illustrons dans la figure 3.3a l'allure de A (aire d'une zone) et la fonction objectif, i.e. le coût total par unité de charge transportée dans une zone de collecte dans la figure 3.3b en fonction de ρ pour x fixé.



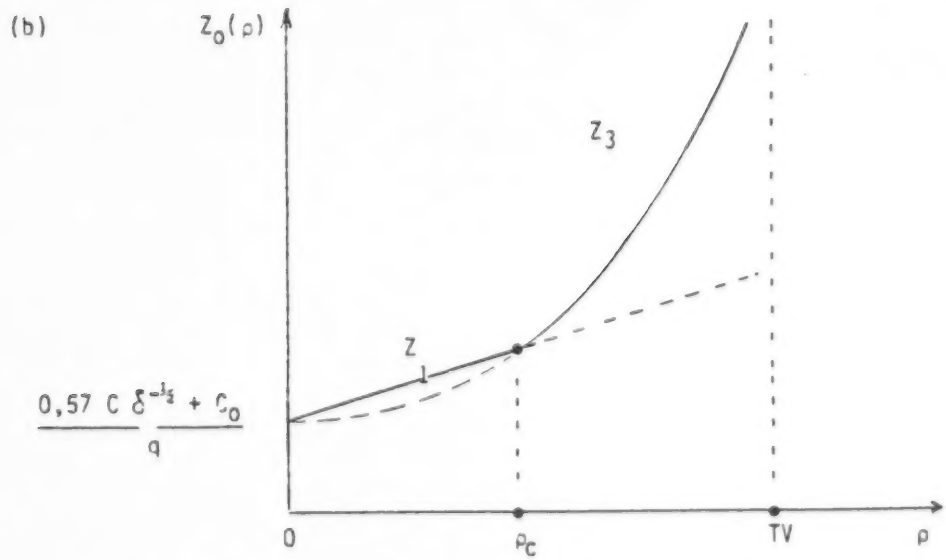


Figure 3.3 : La grandeur optimale (d'une zone) et coût total par unité de charge transportée dans une zone de collecte

La fonction f(x) devient "plate" au voisinage de son optimum pour $g_c \prec g \prec \infty$ (Daganzo, 1984b) où $0 \prec g_c \prec 1$ (voir tableau 3.1). Si on examine le tableau 3.1, on remarque que la valeur optimale de x est dans l'intervalle]6,7 ; 9,3]. D'après Han et Daganzo (1986), il n'est pas nécessaire de prendre une valeur optimale précise de x à cause de l'allure de f(x).

Ainsi, le choix pour $x^* \cong 8,0$ (Han, 1984) se justifie et s'applique dans notre cas. En effet, il suffit d'examiner le tableau 3.1 donnant les solutions optimales de f(x), pour $0 \prec g \prec \infty$, comparées à f(x*). On remarque que la différence Δ est négligeable et plus petite que 0,45 % (avec $\Delta\ \% = \left[\frac{f(x^*) - f(x)}{f(x)} \right] 100\ \%$ et x* = 8,00095).

Tableau 3.1 : Solutions optimales de f(x) comparées à f(x*)

g	x	f(x)	f(x*)	Δ %
0	6,70009	0,57222	0,57599	0,13
1	7,99999	1,32877	1,32877	0,00
2	8,40099	2,08038	2,08155	0,06
4	8,80009	3,58098	3,58709	0,17
6	8,90009	5,08064	5,09265	0,24
8	9,00009	6,58000	6,59819	0,28
10	9,00009	8,07927	8,10375	0,30
100	9,20001	75,53533	75,85348	0,42
500	9,30010	375,33523	376,96341	0,43
1000	9,30010	750,08496	753,35008	0,44
10000	9,30010	7495,57959	7528,32421	0,44
10^b	9,30010	749500,00000	752775,38936	0,44

Finalement, tenant compte des résultats précédents (cas 1, 2 et 3), le modèle analytique exprimé par (3.10), (3.11a) et (3.12a) peut se mettre sous la forme suivante

$$\text{Min } Z_0 = \alpha Z_1 + (1-\alpha)\, Z_3 \tag{3.24}$$

$$\alpha = \begin{cases} 1, & \text{si } L/2 \leq \rho \leq \rho_c \\ 0, & \text{si } \rho_c \leq \rho \leq TV \end{cases} \tag{3.25}$$

3.2.2.4 Étude particulière pour l'anneau central

L'hypothèse de rectangularité de zones admise dans l'analyse précédente ne peut pas s'appliquer pour les zones de l'anneau central. L'approche souvent utilisée consiste à diviser l'anneau central en zones en forme de pointes de tarte (figure 3.4).

Dans ce cas, il n'y a pas de distance de navette (i.e. $\rho=L/2$) car les zones touchent le dépôt (figure 3.5). Les camions desservent ces zones en suivant la même stratégie de "dual-strip routing". Le modèle formulé par (3.10), (3.11a) et (3.12a) est valable au point de vue théorique mais ne présente aucun intérêt sur le plan pratique pour l'anneau central. La contrainte de durée ne joue aucun rôle à ce niveau car les zones sont petites et on peut donc la laisser tomber. Il suffit donc de faire le design des zones en tenant compte de la contrainte de capacité sur les camions. Posons

N_1 = le nombre de zones (ou de camions) dans l'anneau central;

r_1 = le rayon de l'anneau central.

Le problème s'écrit, pour l'anneau central,

$$\text{Min } \bar{Z} = \left[\frac{0{,}57\ \delta^{-\frac{1}{2}}\, C + C_0}{q}\right] N_1 \tag{3.26}$$

s.c.

$$A \leq \frac{Q}{\delta\, q} \tag{3.12a}$$

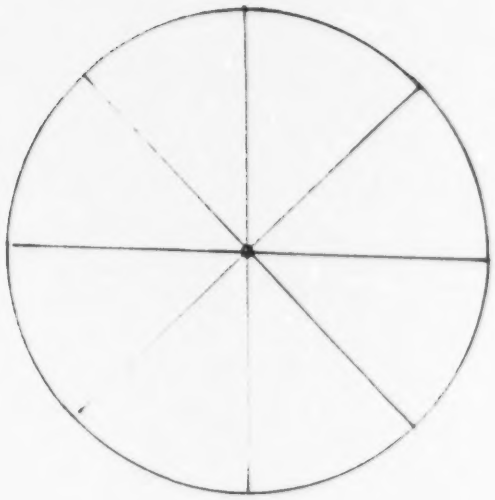


Figure 3.4 : Découpage en pointes de tarte de l'anneau central

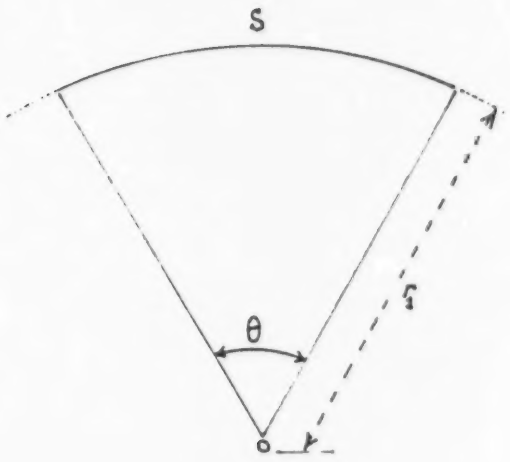


Figure 3.5 : Une zone de l'anneau central

D'après la figure 3.5, l'aire de la zone peut être approximée par

$$A = \frac{1}{2} r_1 S \qquad (3.27)$$

Or,

$$S = r_1 \theta \qquad , 0 < \theta < \pi \qquad (3.28)$$

On obtient, en remplaçant (3.28) dans (3.27) :

$$A = \frac{1}{2} r_1^2 \theta \qquad , 0 < \theta < \pi \qquad (3.29)$$

On peut déterminer θ en utilisant (3.29) et (3.12a) saturée. On a

$$\theta = \frac{2 Q}{\delta q r_1^2} \qquad (3.30)$$

Pratiquement, cette expression doit être strictement inférieure à π(radians). Ainsi, le nombre de zones (ou de camions) est donné par

$$N_1 = \frac{2\pi}{\theta} = \frac{\pi r_1^2 \delta q}{Q} \qquad (3.31)$$

La fonction objectif correspondante s'écrit

$$\bar{Z}^* = \pi r_1^2 \delta \left[\frac{0,57 \delta^{-\frac{1}{2}} C + C_o}{Q}\right] \qquad (3.32)$$

Les résultats obtenus dans (3.31) peuvent être arrondis à l'entier le plus près. Toutefois, il faut avoir à l'esprit que le facteur de jugements humains joue un rôle important au niveau de la planification stratégique.

3.2.2.5 Algorithme de solution

Langevin et Soumis (1989) ont présenté un algorithme de solution pour déterminer les rayons des anneaux intérieurs en partant de la périphérie, en utilisant l'équation issue de la contrainte temporelle saturée et, de là, la longueur L de la zone est donnée par

$$L = \frac{A}{\ell^*}$$

où ℓ^* est la largeur optimale de la zone.

Ainsi, on peut de façon similaire exprimer la longueur de la zone de collecte dans chaque cas étudié précédemment par

$$L = \frac{Q}{x_1^{1/2}\,\delta^{1/2}\,q} \qquad , L/2 < \rho < \rho_c \qquad (3.33)$$

$$L = \frac{Q}{(x_1\delta)^{1/2} q} = \frac{TV - \rho}{\left[\psi(x_1)\, x_1^{1/2} + (x_1\delta)^{1/2} t\, V\right]} \qquad , \rho = \rho_c \qquad (3.34)$$

$$L = \frac{TV - \rho}{\left[\psi(x_2)\, x_2^{1/2} + (x_2\delta)^{1/2} t\, V\right]} \qquad , \rho_c < \rho < TV \qquad (3.35)$$

où

$x_1 \cong 6{,}70 \quad , \psi(x_1) \cong 0{,}77$

$x_2 \cong 8{,}00 \quad , \psi(x_2) \cong 0{,}75.$

Il est donc important de déterminer d'abord ρ_c pour pouvoir séparer les trois cas. Ainsi, dès que ρ_c est calculé, on détermine d'abord les rayons intérieur r^c_{k-1} et extérieur r^c_k de la zone correspondant à ρ_c du

$k^{ième}$ anneau en résolvant l'un des systèmes (3.40) ou (3.41) où les inconnues sont r_{k-1} et r_k. On admet donc que $L = r_k - r_{k-1}$ et $\rho = (r_k + r_{k-1})/2$, avec δ constant, pour le $k^{ième}$ anneau.

Ensuite, partant de l'anneau correspondant à ρ_c, on détermine de façon itérative vers le centre les rayons intérieurs r_{k-1} (cas 1) et vers la périphérie les rayons extérieurs r_k (cas 3) des autres anneaux en utilisant les équations suivantes (3.36) et (3.37) respectivement.

Pour le cas 1, on a l'équation

$$L = \frac{A}{\ell^*} = \frac{Q}{(x_1\,\delta)^{1/2}\eta}$$

ou encore

$$r_k - r_{k-1} = \frac{Q}{(x_1\delta)^{1/2}\,\eta} \qquad (3.36)$$

Pour le cas 3, on se sert de l'équation

$$L = \frac{TV - \rho}{\lfloor \Psi(x_2)\; x_2^{1/2} + (x_2\delta)^{1/2}\; tV \rfloor}$$

On remplace L et ρ par leurs expressions et on obtient

$$r_k - r_{k-1} = \frac{TV - \lfloor (r_k + r_{k-1})/2 \rfloor}{\lfloor \Psi(x_2)\; x_2^{1/2} + (x_2\delta)^{1/2}\; tV \rfloor}$$

ou encore

$$r_k \lfloor \Psi(x_2)\; x_2^{1/2} + (x_2\delta)^{1/2}\; tV \rfloor - r_{k-1} \lfloor \Psi(x_2)\; x_2^{1/2} + (x_2\delta)^{1/2}\; tV \rfloor$$

$$= TV - \frac{r_k}{2} - \frac{r_{k-1}}{2} \quad .$$

Cette expression devient, en posant

$$\beta_1(x_2) = \psi(x_2)\, x_2^{\frac{1}{2}} + (x_2\delta)^{\frac{1}{2}}\, tV - 1/2 \qquad (3.37a)$$

$$\beta_2(x_2) = \psi(x_2)\, x_2^{\frac{1}{2}} + (x_2\delta)^{\frac{1}{2}}\, tV + 1/2 \qquad (3.37b)$$

$$\beta_2(x_2)\, r_k - \beta_1(x_2)\, r_{k-1} = TV \quad .$$

D'où en divisant membre à membre par β_2, on trouve l'équation

$$r_k - \left[\frac{\beta_1(x_2)}{\beta_2(x_2)}\right] r_{k-1} = \frac{TV}{\beta_2(x_2)} \qquad (3.37)$$

Après avoir déterminé les r_{k-1} et r_k, on peut calculer également le nombre de zones N_k dans chaque anneau. On a

$$N_k = \frac{\text{circonférence moyenne}}{\text{largeur optimale de la zone}}$$

$$= \frac{2\pi\rho}{x^*} = \frac{2\pi\,(r_k + r_{k-1})/2}{x^*}$$

D'où

$$N_k = \frac{\pi\,(r_k + r_{k-1})\,\delta^{\frac{1}{2}}}{(x^*)^{\frac{1}{2}}} \qquad (3.38)$$

où

$$x^* = \begin{cases} x_1 \ , & L/2 \leq \rho \leq \rho_c \\ x_2 \ , & \rho_c \leq \rho \leq TV \end{cases} \qquad (3.39)$$

Pour l'anneau central, N_1 est donnée par (3.31).

Présentation de l'algorithme de solution

1. Calculer ρ_c par (3.19).

2. Résoudre (3.40) ou (3.41)

$$\begin{cases} r_k + r_{k+1} = 2\,\rho_c \\ r_k - r_{k-1} = \dfrac{\Omega}{(x_1\delta)^{1/2}\eta} \end{cases} \tag{3.40}$$

ou

$$\begin{cases} r_k + r_{k-1} = 2\,\rho_c \\ r_k - \dfrac{\beta_1(x_1)}{\beta_2(x_1)}\, r_{k-1} = \dfrac{TV}{\beta_2(x_1)} \end{cases} \tag{3.41}$$

où β_1 et β_2 sont données respectivement par (3.37a) et (3.37b) avec $x_1 = 6{,}70$.

La solution trouvée correspond à r^c_{k-1} et r^c_k de l'anneau où les deux contraintes sont saturées (i.e. cas 2 avec $\rho=\rho_c$) et le N_k correspondant est donné par (3.38) et (3.39).

3. Déterminer, pour $L/2 < \rho < \rho_c$, à partir de la solution trouvée à l'étape 2, le r_{k-1} à l'aide de (3.36). Si $r_{k-1} < \varepsilon$, où ε représente l'erreur choisie, aller à l'étape 7 (on est rendu à l'anneau central). Sinon, aller à l'étape 5.

4. Déterminer, pour $\rho_c < \rho < TV$, en partant de la solution trouvée à l'étape 2, le r_k par l'équation (3.37). Si $r_k - R > 0$, poser $r_k = R$.

5. Calculer N_k par les équations (3.38) et (3.39) selon le cas (arrondir au besoin à l'entier le plus près).

6. Répéter les étapes 3 et 5 (pour $L/2 < \rho < \rho_c$) pour chacun des anneaux en allant vers le centre et les étapes 4 et 5 (pour $\rho_c < \rho < TV$) en allant vers l'extérieur. Aller à l'étape 8.

7. Calculer N_1 par (3.31).

   Aller à l'étape 4.

8. Calculer le coût total optimal par unité de charge transportée dans chaque anneau Z_k^* par (3.42) et ensuite dans toute la région de collecte Z^* par (3.43) où $\bar{Z}^*$ est donnée par (3.32)

$$Z_k^* = [\alpha\, Z_1^k + (1-\alpha)\, Z_3^k]\, N_k \qquad (3.42)$$

et

$$Z^* = \bar{Z}^* + \sum_k Z_k^* \qquad (3.43)$$

avec α donné par (3.25) et l'indice k ($k \geq 2$) désigne le $k^{ième}$ anneau.

CONCLUSION

Nous avons présenté tout au long de ce mémoire deux parties essentielles sur la logistique, à savoir une synthèse de travaux importants réalisés au cours des trois dernières décennies dans le domaine de la modélisation continue en logistique et une analyse d'un problème concret de logistique, la collecte de lait frais, par des méthodes analytiques d'approximation continue.

En élaborant une telle synthèse, nous avons voulu mettre au point, d'ores et déjà, une revue de littérature faisant ressortir de façon générale les problèmes de logistique étudiés à l'aide des modèles continus, domaine qui, semble-t-il, reste de nos jours sous-estimé malgré son importance au niveau de la planification stratégique. À cet effet, l'approche méthodologique adoptée pour développer cette partie consistait à regrouper les problèmes de logistique en catégories ou types. Ainsi, chaque problème de logistique traité a été identifié et classé en tenant compte de sa formulation générale ainsi que certains critères de classification, tels que l'objectif, les variables de décision et le système de paramètres. Chaque type de problème est décrit brièvement et comporte ses références appropriées. Nous avons donc essayé dans la majorité des cas de fournir une courte présentation claire et concise pour certaines références.

Assurément, cette revue de littérature assez étoffée, tout en étant la première de ce genre dans le domaine de modélisation continue pour les problèmes de logistique, vient de défricher les chemins qu'emprunteront les chercheurs déjà impliqués dans ce domaine pour mieux appréhender leurs recherches futures. Elle constitue donc un outil efficace d'information et de référence dans le domaine mentionné.

En ce qui concerne l'analyse du problème de collecte de lait frais à l'aide des méthodes analytiques d'approximation continue, nous avons développé un modèle analytique où les contraintes temporelle et de capacité sur les camions effectuant la collecte sont traitées à la fois pour déterminer le design des zones affectées chacune à un seul camion.

Alors que la contrainte temporelle ou de capacité sur les véhicules est souvent la seule considérée (par exemple, Han et Daganzo, 1986; Langevin et Soumis, 1989), notre approche montre et explique clairement, sous certaines conditions, à quel niveau chacune des deux contraintes considérées devient active. De là, il est donc fort utile de caractériser la situation où les deux contraintes sont en même temps actives. Dans ce cas, la distance critique du dépôt au centre de la zone est déterminée. Au-delà de cette distance, la durée de collecte devient contraignante alors que la capacité du camion l'est dans le cas contraire.

Enfin ce modèle permet au planificateur, à partir de peu de données, de prévoir de façon presque optimale le nombre de camions en tenant compte de leur capacité et de contrôler simultanément les coûts associés.

Pour les recherches futures relatives à ce modèle, on pourrait éventuellement penser à réaliser une comparaison avec les résultats obtenus en utilisant deux types de véhicules, c'est-à-dire en créant un terminal de transbordement dans chaque district (si nécessaire) où les véhicules locaux effectuent la collecte jusqu'au terminal et un véhicule de navette ramène toute la collecte du terminal à l'usine (dépôt). Par ailleurs, il serait véritablement possible d'étendre le modèle dans le cas où la production journalière varie d'un fournisseur à l'autre de façon aléatoire ou encore dans le cas où la densité des fournisseurs varie en fonction du rayon. De telles éventualités pourraient certainement affecter le design des zones.

BIBLIOGRAPHIE

AIKENS, C.H. (1985), "Facility Location Models for Distribution Planning", European Journal of Oper. Res. 22, 263-279.

ARROW, K.J., KARLIM, S. et SCARF, H. (1958), Studies in the Mathematical Theory of Inventory and Production, Stanford University Press, Stanford, Californie.

BANKS, J., DRISCOLL, W. et STANFORD, R. (1982), "Design Methodology for Airport Limousine Service", Trans. Sc. 16, 127-148.

BEARDWOOD, J., HALTON, J.H. et HAMMERSLEY, J.M. (1959), "The Shortest Path Through Many Points", Proc. Cambridge Philosophical Society 55, 299-329.

BECKMANN, M. (1952), "A Continuous Model of Transportation", Econometrica 20, 643-660.

BECKMANN, M. (1968), Location Theory, Random House, New York.

BÉLISLE, J.-P. (1989), "La modélisation analytique de transport porte-à-porte et ses applications au transport adapté", Les Cahiers du GERAD, G-89-02.

BLUMENFELD, D.E. et BECKMANN, M. (1985a), "Use of Continuous Space Modeling to Estimate Freight Distribution Costs", Trans. Res. 19A, 173-187.

BLUMENFELD, D.E., BURNS, L.D., DILTZ, J.D. et DAGANZO, C.F. (1985b), "Analyzing Trade-Offs between Transportation, Inventory and Production Costs on Freight Networks", Trans. Res. B 19B(5), 361-380.

BLUMENFELD, D.E., HALL, R.W. et JORDAN, W.C. (1985c), "Trade-Off between Freight Expediting and Safety Stock Inventory Costs", Journal of Business Logistics 6, 79-100.

BRANDEAU, M.L. et CHIU, S.S. (1989), "An Overview of Representative Problems in Location Research", Management Sci. 35(6), 645-674.

BODIN, L.D., GOLDEN, B.L., ASSAD, A.A. et BALL, M.O. (1983), "Routing and Scheduling of Vehicles and Crews - The State of the Art", Comput. Oper. Res. 10(2), 63-212.

BOWERSOX, D.J. (1978), Logistical Management, 2e édition, Macmillan Publishing, New York.

BURNS, L.D., HALL, R.W., BLUMENFELD, D.E. et DAGANZO, C.F. (1985), "Distribution Strategies that Minimize Transportation and Inventory Costs", Oper. Res. 33, 469-490.

CAMPBELL, J.F. (1988), "Freight Consolidation, Terminal Location and Routing with Transportation Economics of Scale", School of Business Administration, University of Missouri, St-Louis.

CAMPBELL, J.F. (1989a), "Designing Logistics Systems by Analyzing Transportation, Inventory and Terminals Cost Trade-Offs", School of Business Administration, University of Missouri, St-Louis.

CAMPBELL, J.F. (1989b), "One-to-Many Distribution with Transshipments", School of Business Administration, University of Missouri, St-Louis.

CAMPBELL, J.F., "Locating Transportation Terminals to Serve an Expanding Demand", à paraître dans Trans. Res. B.

CAVALIER, T.M. et SHERALI, H.D. (1986), "Euclidian Distance Location-Allocation Problems with Uniform Demands over Convex Polygons", Trans. Sci. 20, 107-116.

CLARENS, G. et HURDLE, V. (1975), "An Operating Strategy for a Commuter Bus System", Trans. Sci. 9, 1-20.

CLARKE, G. et WRIGHT, J.W. (1964), "Scheduling of Vehicles from a Central Depot to a Number of Delivery Points", Oper. Res. 12(4), 568-581.

DAGANZO, C.F. (1978), "An Approximate Analytic Model of Many-to-Many Demand Responsive Transportation Systems", Trans. Res. 12, 325-333.

DAGANZO, C.F. (1984a), "The Length of Tours in Zones of Different Shapes", Trans. Res. B 18B(2), 135-145.

DAGANZO, C.F. (1984b), "The Distance Traveled to Visit N Points with a Maximum of C Stops per Vehicle: An Analytic Model and an Application", Trans. Sc. 18, 331-350.

DAGANZO, C.F. (1984c), "Checkpoint Dial-a-Ride Systems", Trans. Res. B 18B, 315-327.

DAGANZO, C.F. (1985), "Supplying a Single Location from Heterogeneous Sources", Trans. Res. B 19B(5), 409-420.

DAGANZO, C.F. (1987a), "Modeling Distribution Problems with Time Windows: Part I", Trans. Sci. 21(3), 171-179.

DAGANZO, C.F. (1987b), "Modeling Distribution Problems with Time Windows. Part II: Two Customer Types", Trans. Sci. 21(3), 180-187.

DAGANZO, C.F. (1987c), "The Break-Bulk Role of Terminals in Many-to-Many Logistic Networks", Oper. Res. 35(4), 543-555.

DAGANZO, C.F. (1988a), "Shipment composition Enhancement at a Consolidation Center", Trans. Res. B 22B(2), 103-124.

DAGANZO, C.F. (1988b), "A Comparison of In-Vehicle and Out-Vehicle Freight Consolidation Strategies", Trans. Res. B 22B(3), 173-180.

DAGANZO, C.F., HENDRICKSON, C.T. et WILSON, N.H.M. (1977), "An Approximate Analytic Model of Many-to-One Demand Responsive Systems", Proc. Seventh Int. Symp. on Transpo. and Traffic Theory, Kyoto, Japon, 743-772.

DAGANZO, C.F. et NEWELL, G.F. (1985), "Physical Distribution from a Warehouse: Vehicle Coverage and Inventory Levels", Trans. Res. B 19B(5), 397-408.

DAGANZO, C.F. et NEWELL, G.F. (1986), "Configuration of Physical Distribution Networks", Networks 16, 113-132.

DASKIN, M.S. (1985), "Logistics: An Overview of the State of the Art and Perspectives on Future Research", Trans. Res. A 19A(5/6), 383-398.

EILON, S., WATSON-GANDY, C.D.T. et CHRISTOFIDES, N. (1971), Distribution Management: Mathematical Modelling and Practical Analysis, Hafner, New York.

ERLENKOTTER, D. (1989), "The General Optimal Market Area Model", Annals of Oper. Res. 18, 45-70, Western Management Science Institute, University of California, Los Angeles.

FAIRTHORNE, D. (1965), "Distances between Pairs of Points in Towns of Simple Geometrical Shapes", Proc. of the 2nd Int. Symp. on the Theory of Traffic Flow, 391-406, OECD, Paris.

GEOFFRION, A.M. (1979), "Making Better Use of Optimization Capability in Distribution System Planning", AIIE Transactions 11(2), 96-108.

HALL, R.W. (1984), "Travel Distance Through Transportation Terminals on a Rectangular Grid", Jour. of Oper. Res. Soc. 35(12), 1067- 1078.

HALL, R.W. (1985a), "Research Opportunities in Logistics", Trans. Res. A 19A(5/6), 399-402.

HALL, R.W. (1985b), "Determining Vehicle Dispatch Frequency when Shipping Frequency Differs among Suppliers", Trans. Res. B 19B(5), 421-431.

HALL, R.W. (1987), "Comparison of Strategies for Routing Shipments through Transportation Terminals", Trans. Res. A 21A, 421-429.

HALL, R.W. (1989), "Vehicle Packing", Trans. Res. B 23B(2), 103-121.

HALL, R.W. et DAGANZO, C.F. (1984), "Travel Distance through Transportation Terminals on a Rectangular Grid: Alternative Routing Strategies", Research Publication GMR-4719, General Motors Research Laboratories.

HAN, A.F.W. (1982), "An Optimal Operating Strategy for a Newspaper Delivery System", UCB-ITS-G.R.-82-1, Inst. Trans. Studies, university of California, Berkerley, Californie.

HAN, A.F.W. (1984), "One-to-Many Distribution of Nonstorable Items: Approximate Analytic Models", Ph.D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Dissertation Series, UCB-ITS-D5-84-3, University of California, Berkeley, Californie.

HAN, A.F.W. et DAGANZO, C.F. (1986), "Distributing Nonstorable Items without Transhipments", Trans. Res. Record 1061, 32-41.

HAN, A.F.W. et DAGANZO, C.F. (1989), "Distribution of Perishable Items: Transhipments Allowed", Paper prepared for Trans. Res. Board 68th Annual Meeting, 9-12 janvier 1989, Washington, D.C., U.S.A.

HENDRICKSON, C.T. (1978), "Approximate Analytic Performance Models of Integrated Transit System Components", Ph.D. Thesis, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambrige, Massachusetts.

HENDRICKSON, C.T. (1985), "Research in Transportation System Characteristics and Operations", Trans. Res. A 19A(5/6), 367-369.

JAILLET, P. et ODONI, A.R. (1988), "The Probabilistic Vehicle Routing Problem", in: Vehicle Routing: Methods and Studies, B.L. Golden and A.A. Assad, Eds., Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 293-318.

KANTOROVITCH, L. (1942), "On the Translocation of Masses", Comptes rendus (Dolkady) de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., 37(7-8), 199-201. Reproduced in Management Sci. 5(1), 1-4, 1958.

KOLESAR, P. et BLUM, E.H. (1973), "Square Root Laws for Fire Engine Response Distances", Mgmt. Sci. 19, 1368-1378.

LAMBILLOTTE, D. (1975), La Fonction Logistique dans l'Entreprise, Paris : Dunod.

LANGEVIN, A. (1988), "Planification de Tournées de Véhicules", Thèse de Doctorat, Université de Montréal, Publication #592, Centre de Recherche sur les Transports.

LANGEVIN, A. (1989), "Un outil interactif-graphique de planification de zones de livraison", Université de Montréal, Publication #687, Centre de Recherche sur les Transports.

LANGEVIN, A. et SOUMIS, F. (1989), "Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours Satisfying Time Constraints", Trans. Res. B 23B(2), 123-138.

LAPORTE, G. et NOBERT, Y. (1987), "Exact Algorithms for the Vehicle Routing Problem", in Surveys in Combinatorial Optimization, S. Martello et al., eds., North-Holland Publishers, Amsterdam.

LARSON, R.C. et STEVENSON, K.A. (1972), "On Insensitivities in Urban Redistricting and Facility Location", Oper. Res. 20, 595-611.

LARSON, R.C. et ODONI, A.R. (1981), Urban Operations Research, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

MAGEE, J.F. et BOODMANN, D.M. (1967), Production Planning and Inventory Control, McGraw-Hill Book Company, New York.

MAEJIMA, T. (1979), "An Application of Continuous Spatial Models to Freight Movements in Greater London", Transpn. 8(1), 51-63.

NEWELL, G.F. (1971), "Dispatching Policies for a Transportation Route", Trans. Sci. 5, 91-105.

NEWELL, G.F. (1973), "Scheduling, Location, Transportation and Continuum Mechanics: Some Simple Approximations to Optimization Problems", SIAM, J. Appl. Math. 25, 346-360.

NEWELL, G.F. (1980), Traffic Flow on Transportation Networks, MIT Press, Cambridge, MA.

NEWELL, G.F. et DAGANZO, C.F. (1986a), "Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours-I: A Ring-Radial Network", Trans. Res. B 20B(5), 345-363.

NEWELL, G.F. et DAGANZO, C.F. (1986b), "Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours-II: Other Metrics", Trans. Res. B 20B(5), 365-376.

NEWELL, G.F. et DAGANZO, C.F. (1986c), "Design of Multiple-Vehicle Delivery Tours-III: Valuable Goods", Trans. Res. B 20B(5), 377-390.

ROBERT P. (1978), Dictionnaire, Société du Nouveau Lettré, Paris.

ROSENFIELD, D.B., ENGELSTEIN, I. et FEIGENBAUM, D. (1989), "Strategies for Sizing Service Territories", Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology.

ROY, J. (1990), "La logistique, une intégration horizontale des activités de l'entreprise", présenté dans le cadre du séminaire PLU 6000 au Centre de recherche sur les transports, Université de Montréal, 10 p.

SEXTON, T.R. et BODIN, L.D. (1985a), "Optimizing Single Vehicle Many-to-Many Operations with Desired Delivery Times: I. Scheduling", Trans. Sci. 19(4), 378-410.

SEXTON, T.R. et BODIN, L.D. (1985b), "Optimizing Single Vehicle Many-to-Many Operations with Desired Delivery Times: II. Routing", Trans. Sci., 19(4), 411-435.

SMEED, R.J. (1961), The Traffic Problem in Towns, Manchester Statistical Soc. Norbury Lockwood & Co. Manchester, U.K.

SMEED, R.J. (1965), "A Theoretical Model of Commuter Traffic in Towns", J. Inst. Math. Appli. 1(3), 208-225.

SMEED, R.J. (1968), "Traffic Studies and Urban Congestion", J. Transp. Econ. and Policy 2(1), 33-70.

STEIN, D.M. (1978a), "Scheduling Dial-a-Ride Transportation System", Trans. Sci. 12(3), 232-249.

STEIN, D.M. (1978b), "An Asymptotic Analysis of a Routing", Mathematics of Operations Research 3(2), 89-101.

WARDROP, J.G. (1969), "Minimum Cost Paths in Urban Area", in: Beitrage zur Theorie des Verkehrsflusses, W. Leutzbach and P. Baron (Eds.), Strassenbau und Strassenverkehrstecnnick, 86, 184-190 (Proc. 4th Int. Symp. Theory of Traffic Flow, Karlsruhe, Germany).

WARDROP, J.G. (1971), "Minimum Cost Paths when the Cost per Unit Lenght Depends on Location and Direction", in: Traffic and Flow Transportation, G.W. Newell (Ed.), Elsevier, New York, 429-437 (Proc. 5th Int. Symp. Theory of Traffic Flow and Transportation, Berkeley, CA).

WEISS, G.H. (1985), "An Appreciation of the Work of Reuben J. Smeed", Trans. Res. A 19(2), 85-88.